

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA BROCA DE METAL-DURO NA QUALIDADE DO FURO REALIZADO EM FERRO FUNDIDO DIN GGG50

Bruno Santana Sória, bruno.soria@ufrgs.br
Mateus Trindade Figueiredo, mateustfbr@yahoo.com.br
André João de Souza, ajsouza@ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Departamento de Engenharia Mecânica – DEMEC,
Rua Sarmento Leite, 425 – Centro – CEP: 90050-170 – Porto Alegre, RS.

Resumo: A furação é um dos processos mais utilizados na indústria de fabricação. A qualidade final da operação na peça de trabalho, aliada com menores esforços na ferramenta, gerando maior vida e menores custos, são objetivos para a usinagem. O uso do ferro fundido nodular se destaca pela boa resistência à abrasão, resistência à variações de temperatura, boa capacidade de amortecimento e boa usinabilidade, tornando um material muito utilizado na indústria. Assim, propõe-se avaliar comparativamente os resultados obtidos no processo de furação de corpos de prova de ferro fundido nodular DIN GGG50 para duas geometrias de brocas de metal-duro (três com canais helicoidais e duas com canais retos), com diferentes afiações (padrões e modificadas). Para tanto, foram utilizados três diferentes velocidades de corte e quatro avanços por volta distintos (valores limitados pela capacidade operacional da máquina-ferramenta). A avaliação foi efetuada a partir da medição das parcelas dinâmicas da força de avanço e do momento torçor, dos perfis de rugosidade das paredes dos furos e do desvio geométrico de circularidade dos furos. Além disso, verificou-se a existência de 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 e a qualidade dos furos gerados.

Palavras-chave: broca de metal-duro, ferro fundido nodular, rugosidade, desvio de circularidade.

1. INTRODUÇÃO

A furação com brocas é um dos processos de fabricação mais utilizados na indústria metal mecânica, envolvendo aproximadamente 30% de todas as operações de usinagem de metais (Castillo, 2005).

As brocas podem ser diferenciadas quanto suas características geométricas. Os canais para o escoamento/saída do cavaco têm influência direta sobre o processo de furação e classifica o tipo de broca. Estas também podem ser classificadas de acordo com a forma da haste, o número de canais, o sentido de corte, o comprimento, o diâmetro e a afiação da ponta. As brocas de canais retos caracterizam-se por uma boa resistência à torção e são utilizadas principalmente para furação profunda de ferros fundidos do tipo GG, GGG e ligas de alumínio-silício, sendo seu uso limitado a furos com comprimentos iguais a 15 vezes o seu diâmetro. (Gühring, 1997; Castillo, 2005; Stemmer, 2008).

A Figura (1a) representa uma broca de duas arestas, com seus principais elementos geométricos para uma broca helicoidal. 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. 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 nas Fig. (1b) e (1c).

As brocas podem também ser classificadas quanto ao material constituinte, tais como aço-rápido e metal-duro. A escolha do metal-duro se explica pelo alto nível de dureza associado à resistência ao desgaste e a resistência a quente, mantendo a tenacidade em níveis perfeitamente aceitáveis. Porém, esta vantagem implica em custos mais elevados. 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 em processos com alta produção (Massirer Jr., 2010).

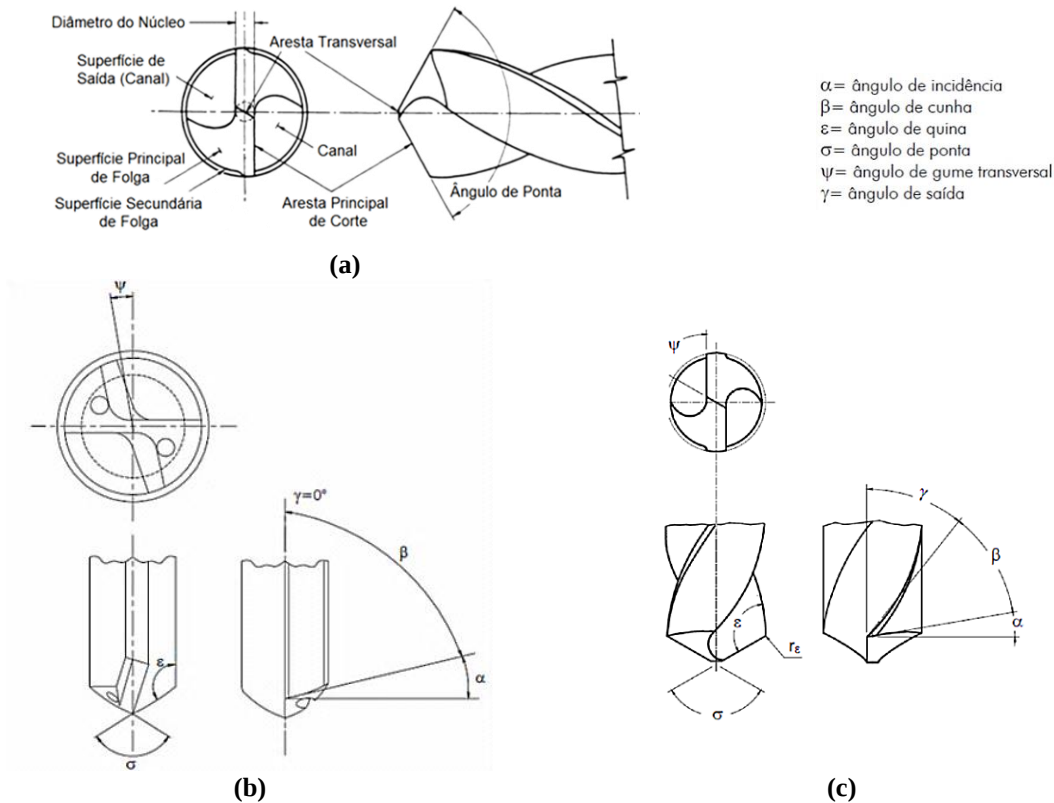


Figura 1. Geometria geral de uma broca: (a) elementos geométricos (Diniz *et al.*, 2010); (b) broca de canais retos (Castillo, 2005); (c) broca de canais helicoidais (Castillo, 2005).

Uma forma de melhorar o desempenho em brocas de metal duro é o emprego de revestimentos. Características – tais como resistência ao desgaste e à abrasão, menor adesão de material da peça na broca, aumento de tenacidade e menor rugosidade em sua superfície – facilitam a extração de cavaco e melhoram o rendimento e a qualidade da furação. Marques (2012) avaliou o desempenho de brocas helicoidais de aço-rápido com dois diferentes tipos de revestimentos na furação de ferro fundido nodular, variando a velocidade de corte e o avanço e analisando o desgaste da ferramenta. Os resultados confirmaram que o uso de revestimentos como AlCrN e TiAlN aumentaram significativamente a resistência das brocas ao desgaste por abrasão.

1.1 Esforços Cortantes na Furação

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 (Diniz *et al.*, 2010; Souza *et al.*, 2014).

A Figura (2) apresenta as decomposições das forças de usinagem originadas 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 na peça.

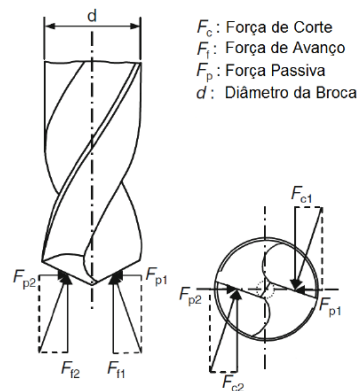


Figura 2. Atuação das forças de corte em uma broca (adaptado de Klocke, 2011).

1.2 Ferro Fundido Nodular

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. Possuem menor custo de produção, quando comparados aos aços comerciais (Almeida, 2008).

O uso de ferro fundido nodular tem sido cada vez maior pois ele é superior a outros tipos de ferros fundidos, apresentando boa resistência à abrasão, capacidade de amortecimento, resistência a variações de temperatura, 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; Sandvik, 2012). Sua boa usinabilidade se deve à presença dos nódulos de grafita na microestrutura que atuam como quebra cavacos, aumentando a lubrificação entre a ferramenta de corte e a peça usinada (Marques, 2012).

O ferro fundido nodular apresenta carbono livre na forma de grafita esferoidal. A principal propriedade deste material é a sua ductilidade (Callister e Rethwisch, 2012). É obtido a partir de adição de pequena quantidade de magnésio ou cério no ferro fundido de alto carbono em estado líquido. Desse modo grafita é produzida a fim de reduzir o efeito de alguns agentes que interferem no processo de nodulação, tais como titânio, chumbo, bismuto e arsênio. A microestrutura resultante é uma matriz perlítica com grafita esferoidal (Chiaverini, 2008). O GGG 50 apresenta maior resistência mecânica, tenacidade e ductilidade que o cinzento devido à morfologia da grafita (Souza *et al.*, 2014).

1.3 Qualidade na Furação

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

O acabamento depende, dentre outros fatores, da dureza das peças de trabalho, das condições das arestas de corte, do avanço e da velocidade de corte empregados no processo. As superfícies geradas por usinagem 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 das irregularidades é medida em um pequeno comprimento de amostragem l_e , denominado *cutoff* (Fonseca *et al.*, 2010).

A rugosidade pode ser caracterizada por diversos parâmetros. Dois muito utilizados são a rugosidade média R_a e a rugosidade total R_t . A rugosidade R_a caracteriza-se por ser a média aritmética das distâncias absolutas do perfil real ao perfil médio determinado pelos picos (Fig. 3a) dentro do comprimento de medição l_m . Já a rugosidade total R_t é a distância entre o pico mais alto e o vale mais profundo no mesmo comprimento de medição l_m (Fig. 3b). Define-se o comprimento l_m a partir de um número n de comprimentos l_e (Almeida, 2008).

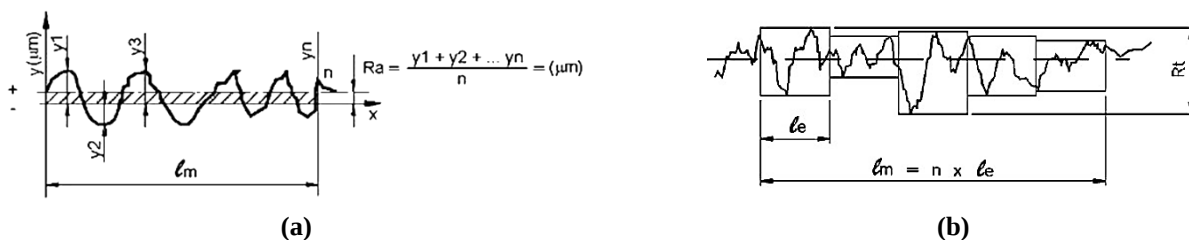


Figura 3. Definição de rugosidade (Almeida, 2008): (a) rugosidade média R_a ; (b) rugosidade total R_t .

Os desvios geométricos são definidos como o grau de variação das superfícies reais com relação aos sólidos geométricos que os definem. Podem ser classificados como retilinearidade, circularidade, cilindridade, conicidade, planicidade etc. (Fonseca *et al.*, 2010). Na furação, os principais desvios considerados são circularidade, cilindridade e concentricidade (Almeida, 2008). Os desvios de circularidade são de extrema importância na indústria de precisão. O erro de circularidade é medido através da circunscrição 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 Fig. (4), o desvio de circularidade é a máxima diferença entre o raio maior R e o raio menor r (Bezerra, 1998).

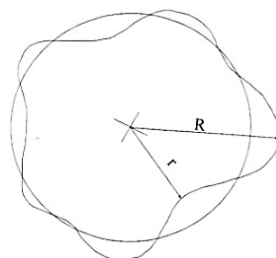


Figura 4. Desvio de circularidade (Bezerra, 1998).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram preparados corpos de prova de ferro fundido nodular DIN GGG50 com dimensões de 100 x 100 x 50 mm com o intuito de avaliar a qualidade dos furos. Foram usadas cinco brocas de metal-duro com revestimento à base de AlCrN e diâmetro $D = 12$ mm com diferentes microgeometrias: três com canais helicoidais, sendo uma broca padrão (B1) e duas outras modificadas (B2 e B3) e duas com canais retos, sendo uma broca padrão (B4) e outra modificada (B5). A Figura (5) apresenta as geometrias de afiação utilizadas (Secta, 2015):

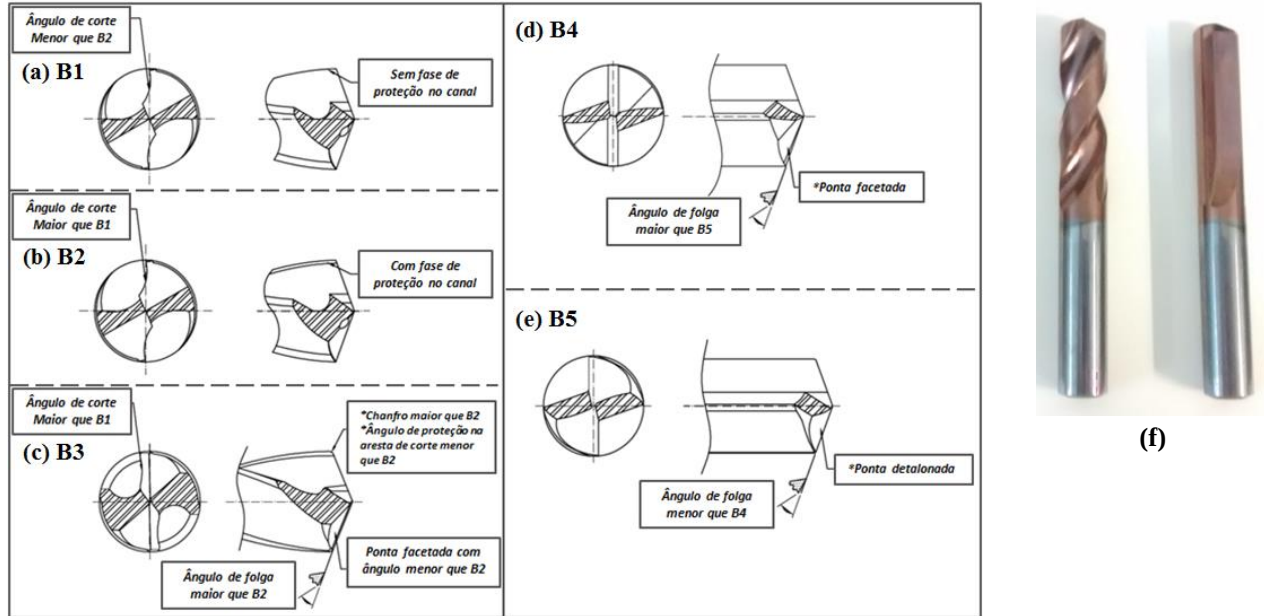


Figura 5. Caracterização das brocas (adaptado de Souza *et al.*, 2014): (a) helicoidal com ponta detalonada (padrão); (b) helicoidal com ponta detalonada (modificada); (c) helicoidal com ponta facetada; (d) reta com ponta facetada (padrão); (e) reta com ponta detalonada; (f) imagem das brocas utilizadas (reta e helicoidal).

Para cada broca foram utilizadas combinações de três velocidades de corte (v_c) e quatro avanços (f), resultando em 12 furos por amostra (Tab. 1). 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.

Tabela 1. Parâmetros de corte de furação para cada furo.

Furo N°	v_c [m/min]	f [mm/volta]	Furo N°	v_c [m/min]	f [mm/volta]
1	100	0,29	7	100	0,41
2	125	0,29	8	125	0,41
3	150	0,29	9	150	0,41
4	100	0,35	10	100	0,47
5	125	0,35	11	125	0,47
6	150	0,35	12	150	0,47

Os furos foram realizados em um centro de usinagem Romi modelo Discovery 308 utilizando-se um fluido biolubrificante isento de óleos Bondmann BD-Fluid B90 em abundância.

Antes de cada ensaio, o erro de batimento na fixação de cada broca foi medido usando um relógio comparador Digimess com resolução de 0,01 mm. A verificação constatou que em nenhum caso o erro não ultrapassou 0,05 mm.

O corpo de prova correspondente foi fixado em um dinamômetro piezoeletrico Kistler modelo 9272 com o objetivo de adquirir a força de avanço (F_f) e o momento torçor (M_t), como mostra a Fig. (6a). Este dinamômetro foi conectado a um condicionador de sinais Kistler modelo 5070A que, por sua vez, foi interligado a um computador para o tratamento e a análise dos sinais obtidos via software LabVIEW, Fig. (6b). A aquisição dos sinais foi feita a uma taxa de 2 kS/s (2000 pontos por segundo). A análise e o tratamento dos dados foram feitos utilizando o software MS Excel. A Figura (6c) representa um esquema simplificado do sistema de monitoramento utilizado e a Fig. (6d) o planejamento dos furos no corpo de prova e a peça já usinada.

Durante a furação, a força de avanço e o momento torçor oscilam em torno de um valor médio. Essa parcela dinâmica indica vibração no processo. Assim, calculou-se a média aritmética e a repetibilidade (Re) dos valores obtidos durante a geração dos furos. Para correlacionar o momento torçor (M_t) com a qualidade do furo, calculou-se a variação do momento ($\Delta M_t = Re$), Eq. (1):

$$Re = \pm t \cdot s \text{ [N}\cdot\text{m]} \quad (1)$$

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

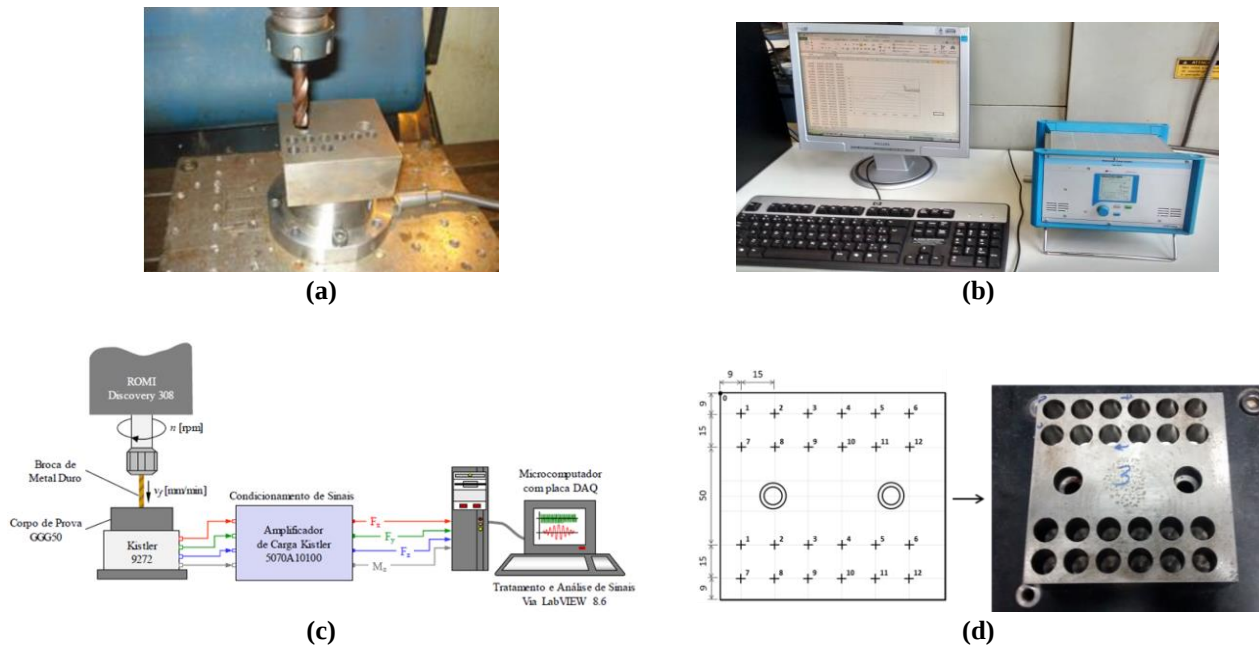


Figura 6. Setup experimental (adaptado de Souza *et al.*, 2014): (a) montagem do experimento; (b) condicionador de sinais e computador usados no ensaio; (c) esquema do sistema de monitoramento; (d) planejamento dos furos e corpo de prova usinado.

As rugosidades média (R_a) e total (R_t) nas paredes dos furos foram mensuradas através do rugosímetro portátil Mitutoyo modelo SJ-201P. Nas medições considerou-se um comprimento de amostragem $l_e = 0,8$ mm para um comprimento de medição $5 \cdot l_e = 4$ mm. A Figura (7a) ilustra as medições.

Os desvios de circularidade foram medidos com o objetivo de quantificar a qualidade geométrica dos furos. 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 Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS). Usou-se uma tolerância superior de $0,2$ mm. Para cada furo mediu-se primeiro o plano ao redor do mesmo usando quatro pontos, e em seguida mediu-se 10 pontos, radialmente espaçados, na borda deste furo. Posteriormente, achou-se necessário medir também o real diâmetro de cada furo usinado para somar o erro já conhecido com a diferença do nominal para o medido. Assim, utilizou-se outra MMC Mitutoyo modelo QM-Measure 353, com precisão de $3 \mu\text{m}$, do Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS-DEMEC-UFRGS), Fig. (7b).



Figura 7. Verificação da qualidade dos furos: (a) medição de rugosidade com rugosímetro portátil SJ-201P; (b) medição dos desvios de circularidade com MMC Mitutoyo QM-Measure 353

O cálculo sugerido para definir os desvios é dado pela Eq. (2):

$$d = e + |D_n - D_m| \quad (2)$$

onde d é o desvio de circularidade [μm] requerido; e é o erro de circularidade [μm] calculado pela MMC Starrett; D_n é o diâmetro nominal da broca [μm]; e D_m é o diâmetro medido de cada furo [μm] calculado com a MMC Mitutoyo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir dos ensaios de furação, foi possível avaliar os esforços cortantes (M_t e F_f), as rugosidades (R_a e R_t) das paredes dos furos usinados e seus desvios de circularidade para melhor compreender a influência da microgeometria das brocas e dos parâmetros de corte na qualidade de cada furo.

3.1 Avaliação dos Esforços Cortantes

Os gráficos da Fig. (8) apresentam os esforços cortantes em cada condição de corte para os 12 furos realizados. 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.

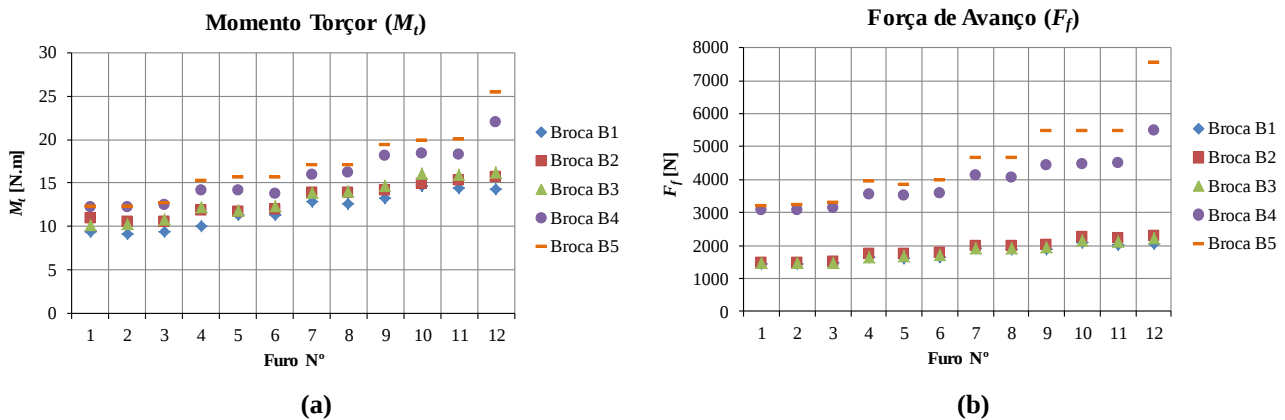


Figura 8. Esforços de corte: (a) momentos de torção médios; (b) forças de avanço médias.

Através da Fig. (8a), observa-se que o avanço f apresenta maior influência sobre o momento torçor (M_t) pela variação dos parâmetros utilizados (vide Tab. 1). O mesmo não ocorre com a velocidade de corte (v_c), não apresentando modificações significativas com a mudança de parâmetros. Nota-se também que as brocas de canais retos (B4 e B5) geraram os maiores valores de M_t em comparação com as de canais helicoidais (B1, B2 e B3). Os valores médios de M_t encontrados para os 12 furos com as brocas de B1 a B5 foram, respectivamente, 11,9 N·m – 13,0 N·m – 13,2 N·m – 15,7 N·m – 16,9 N·m. 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, o qual combina maior velocidade de corte (150 m/min) e maior avanço (0,47 mm/volta) gerou valores de momento acima de 20 N·m para as brocas de canais retos.

Com relação à força de avanço (F_f), nota-se primeiramente na Fig. (8b) 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 praticamente duplicaram. A broca B5 (detalonada) apresentou valores médios maiores de F_f que a broca B4 (facetada). As médias dos valores para os 12 furos foram, respectivamente, 4,58 kN e 3,92 kN. A diferença entre as forças geradas pelas duas brocas retas aumenta proporcionalmente com o aumento de f . Observa-se também que F_f não varia significativamente com o aumento de v_c . Para as brocas B1, B2 e B3, percebe-se claramente o aumento de F_f com o aumento de f . A broca B2 (detalonada modificada) gerou um valor médio de 1,87 kN que foi ligeiramente superior aos gerados pelas brocas B3 (facetada) e B1 (detalonada padrão), respectivamente 1,81 kN e 1,76 kN.

Uma observação a se considerar é que 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.

3.2 Avaliação da Rugosidade da Parede do Furo

Após a medição das rugosidades nos furos, foi possível gerar os gráficos da Fig. (9) a partir dos valores de rugosidade média (R_a) e total (R_t), comparando os resultados de cada broca para cada um dos 12 furos (12 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. Em posse dessas médias, foi possível gerar os gráficos de R_a e R_t para cada conjunto de parâmetro de cada broca. Assim, a Fig. (9) mostra que a broca B1 (helicoidal, detalonada e padrão) gerou os maiores valores de rugosidade média e total, seguido pela broca B2 (helicoidal e detalonada). Para os valores de rugosidade determinados pelas brocas B3 (helicoidal e facetada), B4 (reta, facetada e padrão) e B5 (reta e

detalonada) é preciso analisar com mais cuidado os valores de modo a se chegar a uma conclusão. Para isso, as médias das rugosidades obtidas para cada broca foram calculadas, como pode se visto pelo gráfico da Fig. (10).

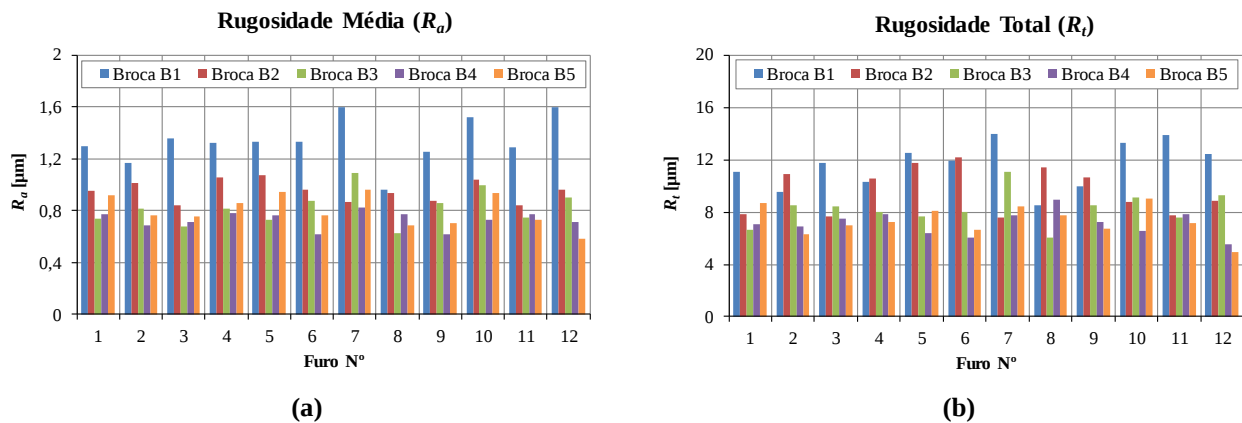


Figura 9. Média dos valores de rugosidades medidos nas paredes dos furos: (a) R_a ; (b) R_t .

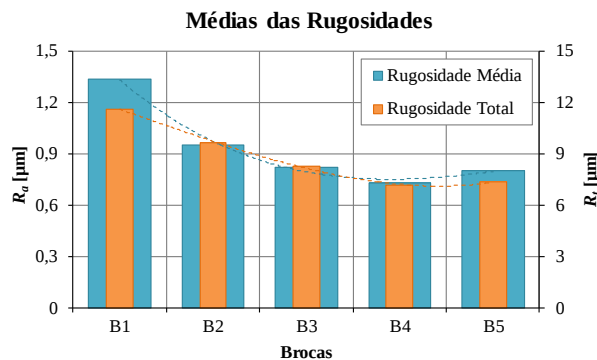


Figura 10. Gráfico da médias das rugosidades em todos os furos gerados por cada broca.

A Figura (10) ilustra que a broca B4 (reta e facetada) foi a que apresentou os menores valores médios de rugosidade média ($0,73 \mu m$) e total ($7,14 \mu m$), seguido pela broca B5 (reta e detalonada) com valores não muito superiores ($\bar{R}_a = 0,80 \mu m$ e $\bar{R}_t = 7,33 \mu m$). Nitidamente as brocas com canais retos geraram menores valores de rugosidade na parede do furo. Durante as análises dos perfis de rugosidade, notaram-se ondulações secundárias na medição de rugosidade, principalmente nas situações com maiores f e v_c em que foram utilizadas brocas helicoidais.

3.3 Avaliação dos Desvios de Circularidade dos Furos

Após as mensurações dos diâmetros medidos (D_m) e dos erros de circularidade (e), utilizou-se a Eq. (2) para obter os desvios de circularidade (d) de cada furo. Com os resultados, foram gerados os gráficos da Fig. (11).

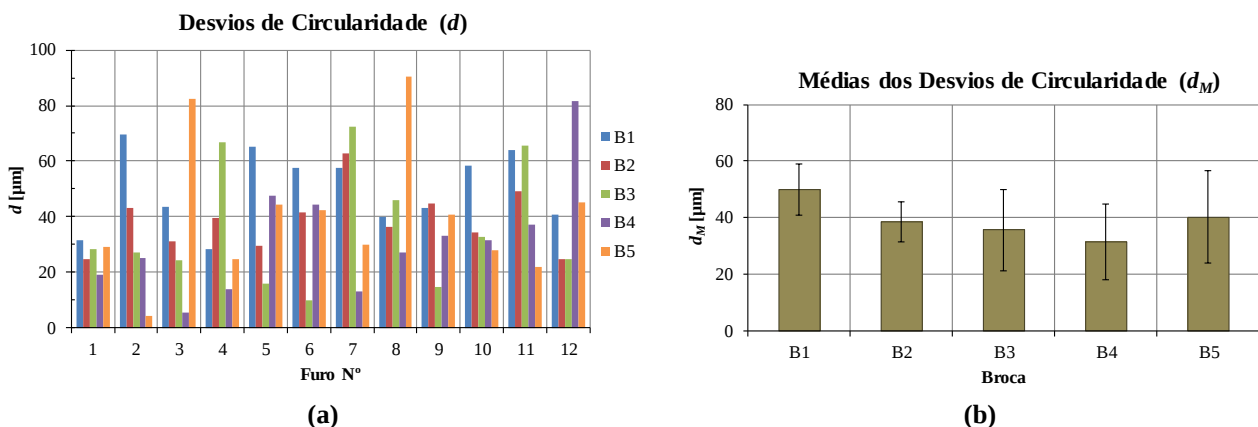


Figura 11. Gráficos dos desvios de circularidade: (a) em função do furo realizado para as diferentes brocas; (b) em função da broca (média dos desvios obtidos em cada furo).

A Figura (11a) apresenta 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. Já a broca B4 (reta facetada) apresentou o menor valor do desvio ($19,2 \mu\text{m}$) e a B1 (helicoidal detalonada padrão), o maior valor ($31,4 \mu\text{m}$), seguindo uma lógica semelhante dos resultados de rugosidade.

Para uma análise geral da qualidade gerada por cada broca, foi plotado um segundo gráfico mostrando as médias dos desvios de circularidade dos furos (d_M) para cada uma das diferentes geometrias de ferramentas (Fig. 11b). Apesar da alta dispersão dos resultados, a partir da análise das médias pode-se dizer que o desempenho das brocas assemelhou-se ao visto na análise da 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 qualidade geométrica ($50,0 \mu\text{m}$). A maior diferença se mostrou na comparação da qualidade da broca reta detalonada B5 ($40,3 \mu\text{m}$), apresentando pior resultado que as brocas helicoidais modificadas B2 ($38,5 \mu\text{m}$) e B3 ($35,6 \mu\text{m}$).

3.4 Correlações entre os Esforços Cortantes e a Qualidade do Furo

Após analisar o desempenho das brocas quanto a seus esforços de corte e qualidades dos furos, foram verificadas algumas correlações entre os valores obtidos com vistas a melhor compreender as causas dos resultados.

No caso, as brocas de canais retos produziram maiores esforços de corte e menores rugosidades em relação às brocas de canais helicoidais. Verificou-se também que os esforços de corte crescem com o aumento do avanço. Entretanto, quando se analisam os valores de rugosidade, o mesmo não pode ser dito. Como mostrado na Fig. (9), não fica claro que a rugosidade é afetada pelo avanço (f) ou se tem uma relação com a força de avanço (F_f). Mesmo quando inseridas curvas de tendência, não há uma conclusão sobre qual a influência desse parâmetro na qualidade das paredes dos furos. Porém, 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) (Fonseca *et al.*, 2010).

Visto isso, para tentar correlacionar os esforços cortantes com a rugosidade, utilizaram-se as médias aritméticas dos momentos de torção (M_t) e da rugosidades médias (R_a) gerados para cada broca em todos os 12 furos. Assim, originou-se o gráfico da Fig.12(a). Observa-se que a rugosidade média tende a diminuir com o aumento do momento torçor, mostrado pela relação inversamente proporcional entre M_t e R_a .

Por outro lado, a variação da amplitude do momento torçor (ΔM_t , Eq. 1) indica uma alteração da velocidade de corte (v_c) e/ou uma modificação da força de corte (F_c). Isso pode alterar a geometria dos furos, verificando-se através dos desvios de circularidade (d). Para comprovar isso, o gráfico da Fig. (12b) mostra a tendência semelhante entre os valores de ΔM_t e os desvios médios de circularidade (d_M), havendo uma boa correlação entre eles.

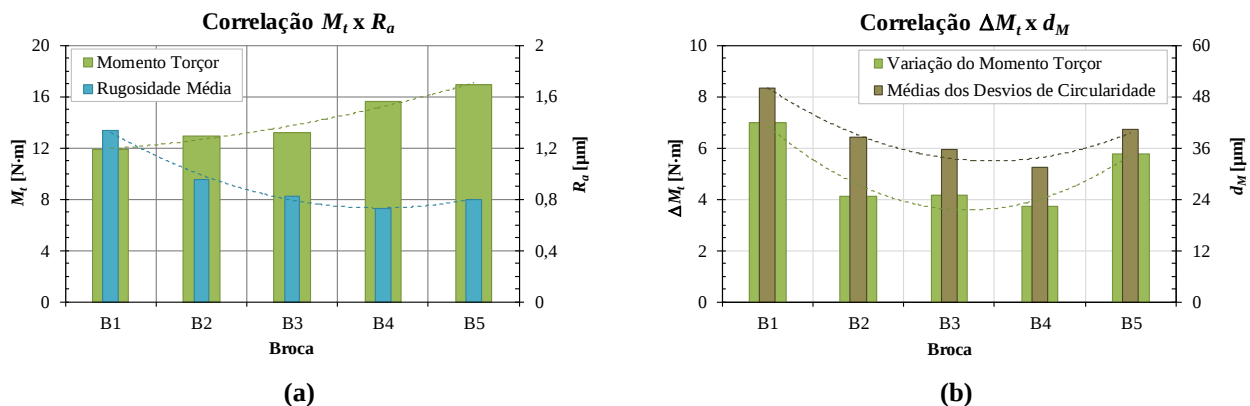


Figura 12: Gráficos de correlação para as cinco brocas analisadas:
(a) entre M_t e R_a ; (b) entre ΔM_t e d_M .

4. 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 biolubrificante durante a operação de corte.

Verificou-se também que os esforços cortantes (força de avanço F_f e momento torçor M_t) são diretamente proporcionais ao aumento do avanço (f) da broca em furação e não são significativamente influenciados pela variação da velocidade de corte (v_c).

Nitidamente as brocas com canais retos geraram menores valores de rugosidade na parede do furo. Durante as análises dos perfis de rugosidade, notaram-se ondulações secundárias na medição de rugosidade, principalmente nas situações com maiores f e v_c em que foram utilizadas brocas helicoidais.

As melhores qualidades superficiais ($\bar{R}_a = 0,73 \mu\text{m}$; $\bar{R}_t = 7,14 \mu\text{m}$) e geométricas ($d_M = 31,6 \mu\text{m}$) dos furos foi obtida pela broca de canais retos B4 (facetada padrão). Comparando com a broca de canais retos B5 (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. Em comparação com a broca B4, a broca B5 resultou em furos com qualidade superficial ligeiramente menor ($\bar{R}_a = 0,80 \mu\text{m}$ e $\bar{R}_t = 7,33 \mu\text{m}$) e qualidade geométrica significativamente menor ($d_M = 40,3 \mu\text{m}$); por outro lado, gerou esforços de corte maiores, com a força de avanço ultrapassando 7,5 kN e o momento torçor em torno de 25,5 N·m na combinação mais crítica de parâmetros (furo 12). Com altos valores de força de avanço (F_f) e momento torçor (M_t), a furação com brocas de canais retos necessita de uma máquina-ferramenta de maior potência que as brocas de canais helicoidais para realizar o mesmo corte. O maior esforço se deu devido ao ângulo de saída ser sempre negativo e, portanto, ter um ângulo de cunha grande.

Dentre as brocas de canais helicoidais, a broca B3 (facetada) foi a que resultou em melhores qualidades superficiais ($\bar{R}_a = 0,82 \mu\text{m}$; $\bar{R}_t = 8,24 \mu\text{m}$) e geométricas dos furos ($d_M = 35,6 \mu\text{m}$), com os resultados comparáveis à broca de canais retos B5 (detalonada). Isso provavelmente se deve ao fato de que, além de 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. A broca helicoidal B2 se mostrou intermediária entre a B1 e a B3 (facetada) quanto à qualidade gerada.

Por fim, foi verificada a tendência da variação da amplitude dos esforços cortantes em influenciar diretamente na qualidade dos furos usinados, mostrando que a redução da vibração durante a operação de corte propicia uma melhoria significativa nesta usinagem.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à Empresa Secta Tools pelos insumos (corpos de prova e ferramentas) utilizados nesse trabalho e ao Prof. Dilson José Aguiar de Souza (UNISINOS) pelo apoio na utilização da máquina de medição por coordenadas tridimensional (MMC).

REFERÊNCIAS

- Almeida, D. O., 2008, “Investigação de desvios geométricos no alargamento de ferro fundido com ferramentas revestidas”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 100 p.
- Bezerra, A.A., 1998, “Influência dos principais parâmetros no processo de alargamento de uma liga de alumínio-silício”, (Mestrado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 139 p.
- Callister Jr., W. D.; Rethwisch, D. G., 2012, “Ciência e Engenharia dos Materiais – Uma Introdução”, 8.ed, LTC Editora, RJ, 817p.
- Castillo, W. J. G. 2005. “Furação profunda do ferro fundido cinzento GG25 com brocas de metal duro com canais retos”, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 134p.
- Chiaverini, V., 2008, “Aços e Ferros Fundidos: Características Gerais, Tratamentos Térmicos, Principais Tipos”, 7. ed., ABM, São Paulo, 599 p.
- Costa, N.; Machado, N.; Silva, F. S., 2008, “Influence of graphite nodules on fatigue limit of nodular cast iron”, *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, v.20, n.1-2, p.120-127.
- Diniz, A. E., Marcondes, F. C., Coppini, N. L., 2010, “Tecnologia da Usinagem dos Materiais”, 7.ed., Ed. Artiber, São Paulo, 262 p.
- Fonseca, M. D.; Gonçalves, R. A.; Machado, A. R., 2010, “Investigação da rugosidade e desvios geométricos (erros de cilindridade e circularidade) no alargamento do ferro fundido vermicular”, *Revista Horizonte Científico (UFU)*, v.4, n.1, p.1-27.
- Gühring, 1997, “Die Ratiobohrer und Ihre Praxisgerechte Anwendung”, Catálogo, Albstadt, Alemanha, 156p.
- Klocke, F., 2011, “Manufacturing Processes I – Cutting”, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 504p.
- Marques, F. M., 2012, “Avaliação do desempenho de brocas helicoidais de aço-rápido revestidas na usinagem de ferro fundido nodular GGG50”. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 77p.
- Massirer Jr., E., 2010, “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, 76p.
- Sandvik, 2012, “Manual Técnico de Usinagem, Parte H – Materiais”, Sandvik Coromant, São Paulo, p.28-29.
- Secta, 2015, “Reafiação de ferramentas rotativas, fabricação de ferramentas especiais, otimização de processos”. Disponível em: <www.sectatools.com.br>. Acesso em: 26/04/2015.
- Souza, A. J.; Mattes, F. B.; Mognaga, G. F., 2014, “Análise dos esforços de corte gerados na furação de ferro fundido DIN GGG50 para brocas de metal-duro com diferentes microgeometrias”, 8º Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (Anais do VIII CONEM), 10 a 15 Ago., Uberlândia, MG, 11p.
- Stemmer, C. E., 2008, “Ferramentas de Corte II”, 4.ed., Editora da UFSC, 314p.

RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

INFLUENCE OF SOLID CARBIDE DRILL GEOMETRY IN THE QUALITY OF HOLE GENERATED BY DIN GGG50 CAST IRON DRILLING

Bruno Santana Sória, bruno.soria@ufrgs.br
Mateus Trindade Figueiredo, mateustfbr@yahoo.com.br
André João de Souza, ajsouza@ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Departamento de Engenharia Mecânica – DEMEC,
Rua Sarmento Leite, 425 – Centro – CEP: 90050-170 – Porto Alegre, RS.

Abstract: Drilling is one of the most commonly processes used in the manufacturing industry. The final quality machining combined with less effort on the tool, generating longer life and lower costs, are goals for machining. Good abrasion resistance, high resistance to temperature variations, high damping capacity and good machinability make the nodular cast iron an important material in the metalworking industry. Thus, it intends to evaluate comparatively 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). For this, three different cutting speeds and four distinct feed rates was used (these values are limited by the operational capability of the machine tool) was used. This assessment was made from the measurement of the dynamic portions of the shear forces (axial force and torque), the surface roughness of the walls of the holes and the geometric deviation of circularity of the holes. It was also found to have occurred correlations 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 tool, nodular cast iron, surface roughness, circularity deviation.