

ANÁLISE DOS DESVIOS GEOMÉTRICOS E DESGASTE DA FERRAMENTA NO PROCESSO DE FURAÇÃO DE UM AÇO AISI 1045 COM BROCA HELICOIDAL DE AÇO RÁPIDO

Irvin William Da Silva Canuto¹

Armando Marques²

André Gustavo de Sousa Galdino³

Mario Cezar dos Santos Junior⁴

Cleudes Guimarães⁵

Luciano Antônio Fernandes⁶

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo (IFES) – Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Vitória, 1729 - Jucutuquara, Vitória - ES, 29040-780.

¹irvin.william@hotmail.com, ²amarques@ifes.edu.br, ³andreg28@gmail.com, ⁴mcezarjr@ifes.edu.br,

⁵cleudes@iftm.edu.br, ⁶luciano.fernandes@uftm.edu.br

Resumo: A operação de furação é utilizada em inúmeras peças dos setores industriais sendo produzidas em sua maioria com auxílio de brocas helicoidais. Dessa maneira, é importante compreender os desvios geométricos dos furos e o desgaste da ferramenta neste processo de usinagem. Isto posto, o presente trabalho objetivou estudar a influência dos parâmetros de corte, tais como: velocidade de corte (V_c), avanço (f) e lubri-refrigeração no processo de furação do aço AISI 1045 com brocas helicoidais de aço rápido (HSS: High-Speed Steel) a fim de buscar uma otimização do processo tendo como indicadores para análise: rugosidade R_a , variação do diâmetro interno e circularidade dos furos, bem como o desgaste de flanco máximo das ferramentas (VB_{max}). Para realização dos experimentos foram utilizadas oito brocas helicoidais e preparados 56 corpos de prova de seção quadrada com profundidade dos furos de 25,4 mm através do centro de usinagem CNC, com adaptação para utilização de uma bomba de mínima quantidade de lubrificante (MQL), aplicado através da nebulização. Foi estabelecido avaliar o desgaste gerado na ferramenta após a realização de 84 furos, em cada ferramenta, através de um estereomicroscópio para aquisição de imagens e através do software Leica LAS EZ para a medição do desgaste de flanco máximo das ferramentas nas fotos. Para a medição da rugosidade R_a , foi utilizado um rugosímetro e para a medição da variação do diâmetro interno e circularidade foi utilizado a máquina de medir por coordenadas. Em cada medição de cada parâmetro, foram realizadas três leituras em três regiões diferentes do furo para obter o desvio-padrão, dispersão dos resultados e a precisão dos furos medidos. Para a análise dos resultados obtidos foram utilizados a metodologia planejamento fatorial que utiliza a combinação de fatores (k) analisados em 2 níveis de variação, para este trabalho foi escolhido três fatores, portanto o número combinações foi igual a 8 cenários diferentes. Com isso, pode-se concluir que: o avanço seguido da velocidade de corte foram os parâmetros de entrada que mais tiveram influência nas variáveis de saída: rugosidade, circularidade e variação do diâmetro interno, enquanto a lubrificação não teve influência significativa; a melhor qualidade geométrica de circularidade e rugosidade dos furos foi obtida com a segunda condição; a menor variação de medição do diâmetro interno foi utilizando a terceira condição, pois teve o menor desvio do diâmetro interno comparado ao diâmetro nominal de 10 mm; e o mecanismo de desgaste predominante nas brocas foi abrasivo.

Palavras-chave: Processo de furação. Broca helicoidal. Desvios geométricos. Desgaste de ferramenta. Mínima quantidade de lubrificação.

1. INTRODUÇÃO

Diniz et. al. (1999) descrevem o processo de furação como sendo um dos processos mais utilizados no ramo de fabricação mecânica. É possível identificar ao menos um furo na maioria das peças fabricadas, sendo estes obtidos através da fundição, forjamento, etc. Em geral, as peças têm que ser furadas através do processo de furação para adquirirem a geometria preestabelecida. A maior parte dos furos é realizado com brocas helicoidais, e cerca de 60% dos processos de furação referem-se a furos curtos, isto é, com profundidade de corte de até 2,5 vezes o diâmetro. Entretanto, há uma demanda grande na indústria para furação com profundidade maior que 5 vezes o tamanho do diâmetro, no qual é denominado furação profunda, onde é requerido o emprego de ferramentas e equipamentos especiais. Todavia, é um processo que apresenta um grau de complexidade maior do que a furação convencional em virtude da dificuldade da formação e saída do cavaco, o comprimento em balanço da ferramenta, qualidade da superfície e as tolerâncias geométricas e de forma do furo (diâmetro, linearidade, cilindridade, circularidade etc.). Neste caso, a qualidade do furo

sofre grande influência da alimentação do fluido de corte sob pressão diretamente para as áreas de corte. Isso ocorre porque ele é o único responsável pela remoção de cavacos.

Conforme Kieckow (2013), a broca helicoidal de aço rápido (HSS, do inglês high speed steel) não é considerada tão rápida em relação às outras. A verdade é que sua principal vantagem é em relação ao seu baixo custo, porém se um processo de furação estiver necessitando de muita rapidez, então um outro material mais avançado e mais caro deverá ser utilizado.

Ainda segundo esse autor, os problemas oriundos do desgaste em ferramentas de corte sempre foram motivos de preocupação, principalmente devido à possibilidade de paradas no processo para troca de ferramentas que resulta em custos adicionais. Por conta disso seria interessante estudar esse tipo de problema com objetivo de evitá-lo e aumentar a vida útil da ferramenta, maior qualidade das peças furadas, menor tempo de parada para troca de ferramenta e, consequentemente, uma maior produtividade.

Os estudos de Diniz et. al. (1999) afirmam que, a imprecisão nos furos com brocas helicoidais torna-se inerente a este processo. A tolerância dimensional normal de superfícies furadas é da ordem de IT11. Ao se tratar de tolerância geométrica esse processo se classifica como insatisfatório, limitando o comprimento do furo ao valor de L/D máximo da ordem de 3, sob o risco do surgimento de excentricidade. Então, quando se requer furos com precisão, deve empregar broca helicoidal e depois o furo passa por operações de acabamento, como operação de alargamento, brochamento, torneamento interno, retificação interna, etc., o que promove o aumento do tempo e do custo do trabalho.

Procurando entender ainda mais o processo de furação, este projeto de pesquisa visa avaliar os diversos fenômenos e parâmetros envolvidos no processo de furação de um aço AISI 1045 com broca helicoidal de aço rápido a fim de buscar uma otimização do processo.

Os trabalhos foram conduzidos nos laboratórios de metrologia, materiais e usinagem do Instituto Federal do Espírito Santo (IFES). Como grandeza de saída avaliaram-se a rugosidade R_a , a variação do diâmetro interno e a circularidade dos furos, bem como o desgaste de flanco das ferramentas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Em conformidade com a norma NBR NM 87/2000 (NORMA BRASILEIRA NORMA MERCOSUL), que determina as composições químicas dos aços, o aço AISI 1045 deve apresentar a composição química descrita na Fig. 1.

C	Mn	P _{máx.}	S _{máx.}	Si
0,43 – 0,50	0,60 – 0,90	0,040	0,050	0,10 – 0,60

Figura 1. Composição química do aço AISI 1045 (em %), (SOUZA, 2001).

Para realização dos ensaios de furação foram fabricados 56 corpos de prova de seção quadrada de aço AISI 1045, com 203,70 mm de comprimento, 25,4 mm de largura e 25,4 mm de altura. A distância entre os furos e da margem da peça se deu através da Eq. (1), aplicando a lógica utilizada por Andrade (2005), Oliveira (2008) e Teixeira (1995).

$$d_f = 1,5 \cdot d \quad (1)$$

A profundidade dos furos foi de 25,4 mm, caracterizando furação curta. A utilização da furação é tratada por Diniz et. al. (2003) que explica que quando a relação da profundidade (L) do furo e do diâmetro (D) do furo for maior do que cinco ($L/D > 5$) caracteriza furação profunda e necessita de brocas especiais. Do contrário, a furação é caracterizada por curta.

Os experimentos para obtenção dos furos foram realizados no centro de usinagem CNC Romi D-600, instalada no Laboratório de Usinagem do IFES – Campus Vitória. A máquina possui o eixo-árvore (spindle) na vertical com rotação de 7000 rpm com potência de 15 KW/ 20 CV, cone do eixo árvore ISO 40 e comando FANUC Series Oi-MC.

A programação foi desenvolvida utilizando ciclos fixos de furação com objetivo de realizar a quantidade pré-estabelecida de 12 furos e parada para medição de desgaste das brocas. A função furação com retração para remoção de cavaco (pica-pau) foi inserida com o objetivo de facilitar a remoção do cavaco da ponta da ferramenta e auxiliar a chegada do fluido na área de corte, porém que também aumenta o tempo de usinagem (MARQUES, 2012). Para medir o batimento radial, foi utilizado o relógio comparador analógico da empresa PANTEC. O comprimento da broca para fora do sistema de fixação por pinça foi de 91,40 mm. Os testes de avaliação do batimento mostraram que a média do batimento radial foi de 0,382 mm.

Para a realização dos ensaios foi utilizado uma bomba de mínima quantidade de lubrificante (MQL), aplicado através da nebulização. Esse sistema é composto por um reservatório com capacidade de 5 litros, uma bomba de deslocamento positivo, tanque com alimentação por gravidade, volume do fluido ajustável por saída e volume de ar ajustável por saída. O sistema pode atingir uma pressão máxima de 30 bar. Os testes de avaliação da variabilidade da vazão ao longo do tempo mostraram que o dispositivo MQL desenvolvido manteve a vazão de 240 ml/h constante e pressão da rede de 5 bar durante seu funcionamento.

Neste trabalho, foram utilizadas brocas de aço rápido classe M2, conforme a DIN 338N, da empresa Heavy Duty com dimensões de comprimento total de 117 mm, comprimento de hélice de 75, diâmetro de 10 mm, ângulo de ponta 118° e

dureza Vickers (HV) entre 750 e 820. Foi estabelecido avaliar o desgaste gerado na ferramenta através de aquisição de imagens após a realização de 84 furos.

A qualidade dos furos foi avaliada através da análise de diferentes parâmetros, como o desvio de circularidade, o desvio do diâmetro interno e a rugosidade da parede do furo. Esta avaliação tem o intuito de registrar a influência que a deterioração da ferramenta exerce sobre a qualidade dos furos.

Para medição de rugosidades dos furos foi utilizado um rugosímetro portátil digital da empresa Mitutoyo (modelo SJ-210). Foi determinado que as medições de rugosidades seriam após os 84 furos em cada condição. Os corpos de prova foram devidamente limpos e codificados, com a finalidade de identificar a sequência da peça e o número da ferramenta.

Na medição da rugosidade R_a , foram realizadas três leituras em três regiões diferentes do furo para se obter o desvio-padrão, dispersão dos resultados e a precisão dos oito furos medidos.

Com o objetivo de evitar erros nas avaliações, todas as medições foram realizadas a uma distância aproximada de 3 mm da borda do furo. O critério de medição escolhido foi o R_a e adotado um cut-off igual a 2,5 mm, parâmetros estes usualmente utilizado para medição de rugosidade em furação de brocas.

Para medição do diâmetro interno e circularidade foi utilizado a máquina de medir por coordenadas, modelo QM-MEASURE 353 da empresa MITUTOYO que visa mensurar as coordenadas físicas de um objeto em várias posições na superfície do objeto com um contato ou sensor óptico.

Na medição destes dois parâmetros, foram realizadas três leituras em três regiões diferentes do furo após 84 furos para se obter o desvio-padrão, dispersão dos resultados e a precisão dos oito furos medidos.

Foi utilizado uma broca por condição e os registros das imagens foram feitos em cada uma. A primeira foto era tirada antes da furação iniciar e uma nova foto era feita após 84 furos para verificar o desgaste ocorrido na ferramenta. O critério de fim de vida foi estabelecido sendo desgaste de flanco médio igual a 0,3 mm. A avaliação de desgaste foi realizada através da medição nas fotos utilizando o software Leica LAS EZ. A partir do software, foi possível criar referências através de linhas e alinhar o desgaste de flanco na broca para medição.

Para selecionar as condições de trabalho para a realização dos ensaios de verificação da influência dos parâmetros de corte sobre as grandezas de saída do processo, foi tomada como base a recomendação do fabricante e tabelas de velocidade de corte e avanço para brocas de aço rápido. Assim, as velocidades de corte, avanço e fluido de corte foram determinadas.

Para a análise dos desvios geométricos e desgaste da ferramenta no processo de furação de um aço AISI 1045 com broca helicoidal de aço rápido foram utilizados a metodologia planejamento fatorial que utiliza a combinação de fatores (k) analisados em 2 níveis de variação ($n_1 = -1$ e $n_2 = 1$) para cada um dos fatores, gerando dessa forma um conjunto com 2^k tratamentos. As vantagens deste método são: fornecer o menor número de experimento para um fatorial completo, a análise dos resultados é relativamente simples, permite detectar uma interação entre os fatores e são largamente usados em experimentos de varredura. Neste caso, os fatores adotados foram: avanço, velocidade de corte e fluido de corte. O número de combinações ou rodadas (n) para um fatorial total com k fatores será $n = 2^k$. Como foi escolhido três fatores, o número combinações foi igual a oito cenários diferentes para o trabalho. A Tabela 1 mostra as condições de parâmetros utilizados nesse ensaio (MONTGOMERY, 2009).

Tabela 1. Parâmetros de corte utilizados.

Condição	f [mm/rot]	Vc [m/min]	Fluido de corte
1	0,1 (+)	20 (+)	a seco (+)
2	0,05 (-)	15 (-)	a seco (+)
3	0,05 (-)	15 (-)	MQL (-)
4	0,1 (+)	20 (+)	MQL (-)
5	0,1 (+)	15 (-)	a seco (+)
6	0,05 (-)	20 (+)	a seco (+)
7	0,05 (-)	20 (+)	MQL (-)
8	0,1 (+)	15 (-)	MQL (-)

Entretanto, devido à quebra da broca helicoidal nas condições 6 e 7 não foi possível utilizar, no software STATISTIC, para calcular os efeitos de interação para gerar os resultados. Dessa maneira, foi criado um modelo a partir do método de regressão linear que estima a condicional (valor esperado) de uma variável y, dados os valores de algumas outras variáveis x para se verificar a relação das variáveis de respostas com os parâmetros de entrada. Dessa forma, o modelo de regressão linear pôde avaliar quais são os parâmetros que tem mais influência nas grandezas de saída do processo. A vantagem deste modelo é que se pode utilizar para fazer previsão de comportamentos com base na associação entre duas ou mais variáveis.

Foi estabelecido o nível de significância de 0,05 (5%), isto quer dizer, que este é o limite que determina se o resultado de um estudo pode ser considerado estatisticamente significativo depois de se realizarem os testes estatísticos projetados, toda vez que o modelo estiver abaixo deste valor ele se torna um fator significativo, e quanto menor for, mais significativo este fator se torna.

Foi utilizado o coeficiente de determinação ou R^2 , que serve para indicar a capacidade que a regressão tem de explicar a variação da resposta. Portanto, quanto maior o R^2 , mais explicativo é o modelo linear. Este valor pode variar entre 0 e 1. Quando 0 significa que há nenhuma relação entre a variabilidade em uma variável que é explicada pela variabilidade de outra e quando é igual a 1 significa uma relação perfeita, mas este último caso é quase impossível de acontecer, pois existem muitos fatores que determinam as relações entre variáveis na vida real e é muito difícil a análise de todos devido aos custos e tempo. Dessa maneira, neste trabalho, foram considerados os parâmetros de entrada mais importantes para análise (MONTGOMERY, 2009).

Foi calculado o desvio padrão que, segundo Montgomery (2009), serve para expressar o quão distantes os valores obtidos estão da média amostral; ou seja, o desvio padrão indica o quanto um conjunto de dados é uniforme. Um desvio pequeno aponta que os dados estão próximos da média ou do valor esperado. Já um alto desvio padrão, sugere que os dados estão dispersos da média (MONTGOMERY, 2009).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a realização de todos os ensaios, foi possível analisar o desgaste das brocas em que na prática os desgastes mais avaliados são o de flanco e o de cratera, sendo utilizados como critérios de fim de vida de uma ferramenta de corte. Os resultados dos desgastes das brocas podem ser observados na Fig. 3. Observou-se que o desgaste de flanco máximo (VB_{max}) foi predominante para todas as condições avaliadas, sendo que para as condições de usinagem a seco por sua vez, mostrou desgaste mais acentuado devido às altas temperaturas geradas durante a furação, quando comparado com as condições de usinagem por MQL, utilizando os mesmos parâmetros, como ilustrado na Fig. 2, pois os fluidos de corte têm influência direta na vida da ferramenta, uma vez que incluem diversas melhorias aos processos de usinagem, tais como: redução do coeficiente de atrito entre a ferramenta e o cavaco; expulsão do cavaco da região de corte; refrigeração da peça em usinagem; maior refrigeração da ferramenta; refrigeração da máquina-ferramenta; e melhor acabamento da peça usinada (DE CASTRO, 2001).

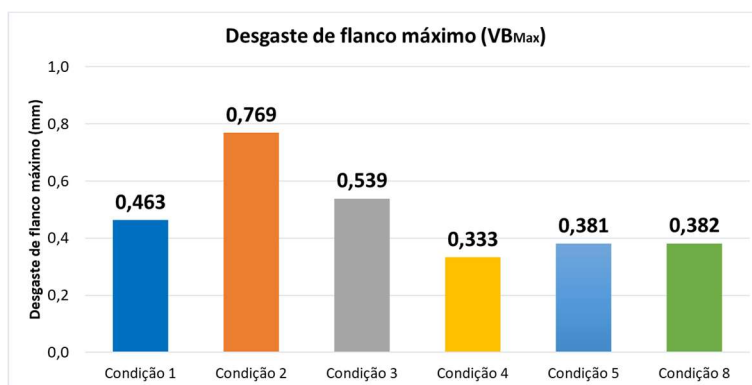


Figura 2. Desgaste de flanco máximo.

As condições 6 e 7 foram desconsideradas nas análises dos resultados, pois não conseguiram completar todos os 84 furos pré-definidos, devido a falha catastrófica das ferramentas de corte. Isto impossibilitou a aquisição de dados suficientes para uma apresentação e análise criteriosa do comportamento destas condições. A ferramenta 6 executou somente 19 furos antes da sua falha completa e a ferramenta 7 usinou apenas 24 furos, apresentando vibração e ruído excessivo durante a usinagem, no qual o processo foi interrompido para se evitar que o porta-ferramenta e a própria peça também viesse a ser danificado. Os parâmetros de corte utilizados nestas condições são iguais, exceto a condição fluido de corte, a seco e MQL, respectivamente. Estes fatores não são desfavoráveis para a broca de aço rápido na usinagem de aço AISI 1045 segundo o fabricante. A hipótese para a falha catastrófica pode ser justificada pela elevação da temperatura em razão do aumento da velocidade de corte, que provoca diminuição da qualidade do furo e aumento do desgaste da ferramenta, considerando que o movimento descrito pela ponta da ferramenta quando submetido ao processo vibratório é transferido para a parede do furo, somado ao fato do baixo avanço da ferramenta que implicou no aumento do atrito ferramenta e peça sem que houvesse remoção de cavaco, portanto, proporcionando maior geração de calor (DIMLA, 2004).

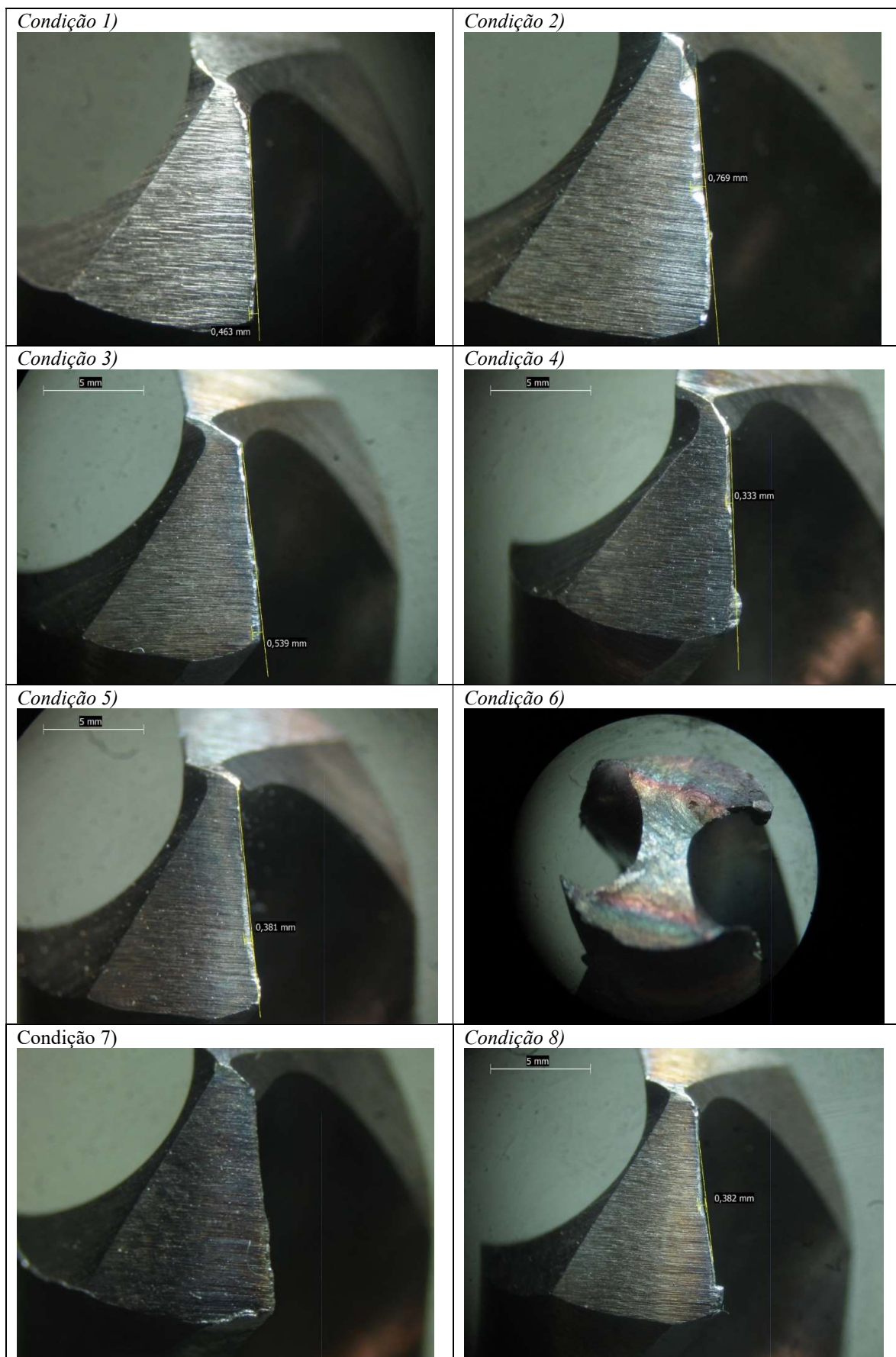


Figura 3. Desgastes das brocas.

Como critério de avaliação dos desgastes, adotou-se a aresta que apresentava a maior marca de desgaste em cada ponto de medição como sendo o valor representativo.

A condição 1 apresentou desgaste de flanco máximo de 0,463 mm próximo a ponta de corte da ferramenta e a condição 4 apresentou 0,333 mm no centro da aresta principal de corte. Ambas com mesmo avanço ($f = 0,1 \text{ mm/rot}$) e velocidade de corte ($V_c = 20 \text{ m/min}$). Tendo como diferença o parâmetro de fluido de corte, a seco e MQL, respectivamente. A velocidade de corte nestas condições foi a mais alta, de modo que as temperaturas geradas no processo foram maiores, diminuindo a vida da broca. Porém, com o emprego do MQL na condição 4, esta teve um desgaste menor do que a condição 1.

A condição 2 apresentou desgaste de flanco máximo de 0,769 mm em toda aresta de corte da ferramenta e a condição 3 apresentou 0,539 mm mais acentuado na ponta de corte da ferramenta. Ambas com mesmo avanço ($f = 0,05 \text{ mm/rot}$) e velocidade de corte ($V_c = 15 \text{ m/min}$), diferenciando apenas o parâmetro de fluido de corte, a seco e MQL, respectivamente. Apesar da velocidade de corte ser menor implicando em temperaturas menores em relação as condições anteriores, o que gerou maior aumento de desgaste foi o avanço, pois avanços muito baixos, favorecem para um desgaste prematuro, embora ocorra com menor influência quando comparado com a velocidade de corte.

A condição 5 apresentou desgaste de flanco máximo de 0,381 mm do centro da aresta principal de corte à ponta da ferramenta e a condição 8 apresentou 0,382 mm no centro da ferramenta. Ambas com mesmo avanço ($f = 0,1 \text{ mm/rot}$) e velocidade de corte ($V_c = 15 \text{ m/min}$), diferenciando apenas o parâmetro de fluido de corte, a seco e MQL, respectivamente. Essas duas condições foram as que apresentaram menor desgaste, isso ocorre devido a vários fatores, dentre eles, ao passo que com o aumento do avanço o corte se torna mais dinâmico, auxiliando no cisalhamento do cavaco (DINIZ, 2003). Como a velocidade de corte não está muito elevada a temperatura não afetou a ferramenta de corte, que por sua vez tende a elevar o desgaste e incapacidade de corte (MACHADO et. al., 2009).

De acordo com a Fig. 4, a média dos valores de rugosidade variaram de 6,566 a 12,717 μm , o que já era previsto para as condições estabelecidas, segundo a literatura. A melhor qualidade geométrica de rugosidade foi observada utilizando-se a oitava condição com taxa de avanço de 0,1 mm/rot, velocidade de corte de 15 m/min e com MQL. Seguido da segunda condição com taxa de avanço de 0,05 mm/rot, velocidade de corte de 15 m/min e a seco, e em terceiro lugar a quarta condição com taxa de avanço de 0,1 mm/rot, velocidade de corte de 20 m/min e com MQL.

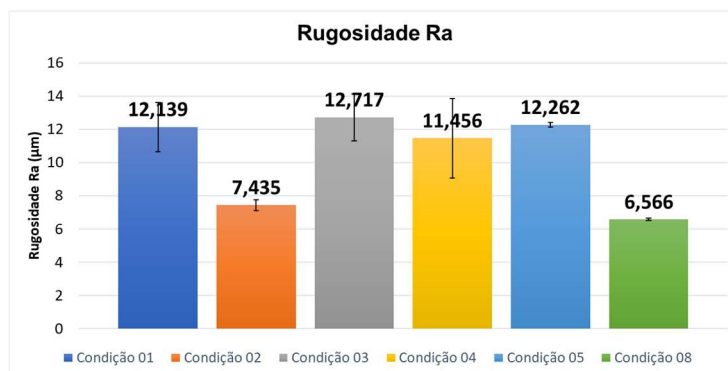


Figura 4. Rugosidade Ra.

Para se verificar a relação entre a rugosidade R_a e os parâmetros de entrada (V_c , f , Lub e Comp) foi desenvolvido um modelo de efeitos principais e interações, o que pode ser observado através da Eq. (2).

$$R_a = 9.34604 + 0.77668 \cdot \text{Comp} + 0.69111 \cdot f + 1.90377 \cdot V_c + 0.14925 \cdot \text{Lub} + 0.03982 \cdot (\text{Comp} \cdot f) + 0.08864 \cdot (\text{Comp} \cdot V_c) - 1.15676 \cdot (\text{Comp} \cdot \text{Lub}) - 1.59404 \cdot (f \cdot \text{Lub}) - 1.10881 \cdot (V_c \cdot \text{Lub}) \quad (2)$$

A partir das fontes de variação do modelo da Eq. (2), foi feita uma análise dos t value dos coeficientes de variação para se verificar quais são as fontes significativas para o modelo de rugosidade R_a , podendo estas serem variações principais, isto é, as variáveis isoladas ou suas interações como mostra a Tab. 2.

Tabela 2. t value dos coeficientes de variação para rugosidade R_a .

Coefficientes	Estimativa	Erro Padrão	Erro	t value Pr(> t)
Intercessão	9.34604	0.24731	37.791	< 2e-16
Comp	0.77668	0.24817	3.130	0.002148
F	0.69111	0.28656	2.412	0.017232
Vc	1.90377	0.28656	6.643	7.03e-10
Lub	0.14925	0.34974	0.427	0.670254

Comp : f	0.03982	0.20334	0.196	0.845055
Comp : Vc	0.08864	0.20334	0.436	0.663589
Comp : Lub	-1.15676	0.35097	-3.296	0.001256
f : Lub	-1.59404	0.40526	-3.933	0.000134
Vc : Lub	-1.10881	0.40526	-2.736	0.007061

Analisando a Tab. 2, que mostra os níveis de significância das fontes de variação do modelo de rugosidade R_a , pode-se verificar que com base no t value a velocidade de corte, o comprimento usinado e o avanço são as fontes de variação principal que apresentam influência significativa, já a lubrificação não é significativo para este modelo tendo t value acima de 0,05. Enquanto nas interações, o avanço e lubrificação; comprimento usinado e lubrificação; e velocidade de corte e lubrificação são as que apresentam influência significativa. As interações comprimento usinado e avanço; e comprimento usinado e velocidade de corte não são significativos para este modelo.

O R^2 de 0,456 significa que o modelo deve explicar 45,6% da variação da rugosidade R_a . Isso mostra que 54,4% da variabilidade da rugosidade R_a não pode ser explicada, possivelmente, devidos aos erros aleatórios.

Como é possível analisar a Fig. 5, a média dos valores de circularidade variaram de 0,016 a 0,082 mm, o que já era previsto para as condições estabelecidas, conforme a literatura. A melhor qualidade geométrica de circularidade foi verificada utilizando a segunda condição com taxa de avanço de 0,05 mm/rot, velocidade de corte de 15 m/min e a seco. Seguindo da oitava condição com taxa de avanço de 0,1 mm/rot, velocidade de corte de 15 m/min e com MQL, e em terceiro lugar a quinta condição com taxa de avanço de 0,1 mm/rot, velocidade de corte de 15 m/min e a seco.

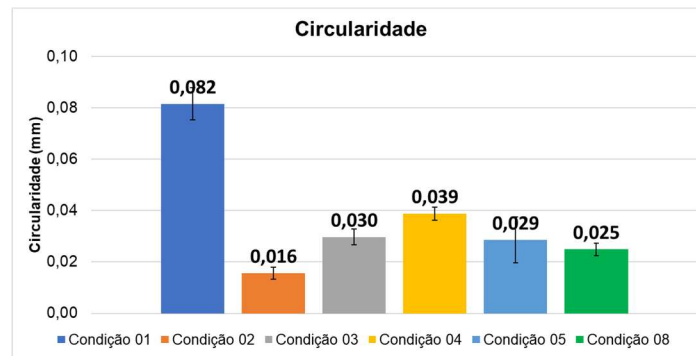


Figura 5. Circularidade.

Para se verificar a relação entre a circularidade e os parâmetros de entrada (V_c , f , Lub e $Comp$) foi gerado um modelo de efeitos principais e interações, o que pode ser observado através da Eq. (3).

$$Cic = 10.20896 - 0.02252 * Comp + 0.03540 * f + 0.03370 * V_c + 0.02226 * Lub + 0.00325 * (Comp * f) + 0.01306 * (Comp * V_c) - 0.02021 * (Comp * Lub) + 0.12012 * (f * Lub) - 0.11616 * (V_c * Lub) \quad (3)$$

A partir das fontes de variação do modelo da Eq. (3), foi feita uma análise dos t value dos coeficientes de variação para se verificar quais são as fontes significativas para o modelo de circularidade, podendo estas serem variações principais, isto é, as variáveis isoladas ou suas interações como mostra a Tab. 3.

Tabela 3. t value dos coeficientes de variação para circularidade

Coefficientes	Estimativa	Erro Padrão	Erro	t value Pr(> t)
Intercessão	10.20896	0.00858	1189.65	< 2e-16
Comp	-0.02252	0.00861	-2.62	0.00994
F	0.03540	0.00994	3.56	0.00051
Vc	0.03370	0.00994	3.39	0.00092
Lub	0.02226	0.01214	1.83	0.06883
Comp : f	0.00325	0.00706	0.46	0.64603
Comp : Vc	0.01306	0.00706	1.85	0.06640
Comp : Lub	-0.02021	0.01218	-1.66	0.09936
f : Lub	0.12012	0.01406	8.54	2.6e-14
Vc : Lub	-0.11616	0.01406	-8.26	1.2e-13

Analisando a Tab. 3, que mostra os níveis de significância das fontes de variação do modelo de circularidade, pode-se verificar que com base no *t value* o avanço, velocidade de corte e o comprimento usinado são as fontes de variação principal que apresentam influência significativa, já a lubrificação não é significativo para este modelo tendo *t value* acima de 0,05. Enquanto nas interações, o avanço e lubrificação; e velocidade de corte e lubrificação são as que apresentam influência significativa. Aliás, estas interações apresentam um nível muito maior de influência significativa comparadas com os efeitos principais citados anteriormente. As interações comprimento usinado e avanço; comprimento usinado e velocidade de corte; e comprimento usinado e lubrificação não são significativos para este modelo.

O R^2 de 0,714 significa que o modelo deve explicar 71,4% da variação da circularidade.

Como se pode observar na Fig. 6, a média dos valores de medição do diâmetro interno variaram de 9,928 a 10,330 mm, o que já era previsto para as condições estabelecidas, de acordo com a literatura. A menor diferença do diâmetro nominal da broca para o diâmetro interno do furo foi percebida utilizando a terceira condição com taxa de avanço de 0,05 mm/rot, velocidade de corte de 15 m/min e MQL. Seguido da segunda condição com taxa de avanço de 0,05 mm/rot, velocidade de corte de 15 m/min e a seco, e em terceiro lugar a quinta condição com taxa de avanço de 0,1 mm/rot, velocidade de corte de 15 m/min e a seco.

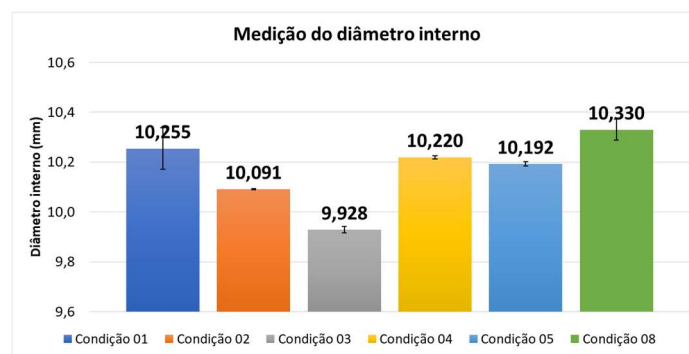


Figura 6. Medição de diâmetro interno.

Para se verificar a relação entre a variação do diâmetro interno e os parâmetros de entrada (V_c , f , Lub e Comp) foi desenvolvido um modelo de efeitos principais e interações, o que pode ser observado através da Eq. (4).

$$DI = 10.20896 - 0.02252 \cdot \text{Comp} + 0.03540 \cdot f + 0.03370 \cdot V_c + 0.02226 \cdot \text{Lub} + 0.00325 \cdot (\text{Comp} \cdot f) + 0.01306 \cdot (\text{Comp} \cdot V_c) - 0.02021 \cdot (\text{Comp} \cdot \text{Lub}) + 0.12012 \cdot (f \cdot \text{Lub}) - 0.11616 \cdot (V_c \cdot \text{Lub}) \quad (4)$$

A partir das fontes de variação do modelo da Eq. (4), foi feita uma análise dos *t value* dos coeficientes de variação para se verificar quais são as fontes significativas para o modelo de variação do diâmetro interno, podendo estas serem variações principais, isto é, as variáveis isoladas ou suas interações como mostra a Tab. 4.

Tabela 4. *t value* dos coeficientes de variação para variação do diâmetro interno.

Coeficientes	Estimativa	Erro Padrão	Erro	t value Pr(> t)
Intercessão	10.20896	0.00858	1189.65	< 2e-16
Comp	-0.02252	0.00861	-2.62	0.00994
F	0.03540	0.00994	3.56	0.00051
Vc	0.03370	0.00994	3.39	0.00092
Lub	0.02226	0.01214	1.83	0.06883
Comp : f	0.00325	0.00706	0.46	0.64603
Comp : Vc	0.01306	0.00706	1.85	0.06640
Comp : Lub	-0.02021	0.01218	-1.66	0.09936
f : Lub	0.12012	0.01406	8.54	2.6e-14
Vc : Lub	-0.11616	0.01406	-8.26	1.2e-13

Analisando a Tab. 4, que mostra os níveis de significância das fontes de variação do modelo de diâmetro interno, pode-se verificar que com base no *t value* o avanço, velocidade de corte e o comprimento usinado são as fontes de variação principal que apresentam influência significativa, já a lubrificação não é significativo para este modelo tendo *t value* acima de 0,05. Enquanto nas interações, o avanço e lubrificação; e velocidade de corte e lubrificação são as que apresentam influência significativa. Aliás, estas interações apresentam um nível muito maior de influência significativa

comparadas com os efeitos principais citados anteriormente. As interações comprimento usinado e avanço; comprimento usinado e velocidade de corte; e comprimento usinado e lubrificação não são significativos para este modelo.

O R^2 de 0,714 significa que o modelo deve explicar 71,4% da variação do diâmetro interno. A Tabela 5 mostra a melhor condição para cada variável de resposta.

Tabela 5 - Ranking para cada variável de resposta.

Condição	Rugosidade (R_a)	Circularidade	Variação do diâmetro interno	VB _{max}
1	4 ^a	6 ^a	5 ^a	4 ^a
2	2 ^a	1 ^a	2 ^a	6 ^a
3	6 ^a	4 ^a	1 ^a	5 ^a
4	3 ^a	5 ^a	4 ^a	1 ^a
5	5 ^a	3 ^a	3 ^a	2 ^a
6	-	-	-	-
7	-	-	-	-
8	1 ^a	2 ^a	6 ^a	3 ^a

4. CONCLUSÕES

Após a realização dos furos em um aço AISI 1045 com broca helicoidal de aço rápido e análise dos resultados, pode-se concluir que:

- O avanço seguido da velocidade de corte foram os parâmetros de entrada que mais tiveram influência nas variáveis de saída: rugosidade, circularidade e variação do diâmetro interno, enquanto a lubrificação não teve influência significativa;
- A melhor qualidade geométrica de circularidade e rugosidade dos furos, foi obtida com a segunda condição ($f = 0,05$ mm/rot, $V_c = 15$ m/min e a seco). Logo, conclui-se que a melhor condição de circularidade e rugosidade ocorreu quando o avanço e velocidade foram mínimas e não teve fluido de corte;
- A menor variação de medição do diâmetro interno foi utilizando a terceira condição ($f = 0,05$ mm/rot, $V_c = 15$ m/min e MQL), pois teve o menor desvio do diâmetro interno comparado ao diâmetro nominal de 10 mm. Logo, conclui-se que a melhor condição de variação de diâmetro interno ocorreu quando o avanço e velocidade foram mínimas e com a presença de MQL;
- O menor desgaste de flanco máximo ocorreu ao se utilizar a quarta condição ($f = 0,1$ mm/rot, $V_c = 20$ m/min e MQL). Logo, conclui-se que a melhor condição que possibilita o aumento da vida útil da ferramenta ocorreu quando o avanço e velocidade foram máximos e com MQL;
- Foi observado que para as mesmas condições de avanço e velocidade de corte, ao utilizar a MQL o desgaste de flanco máximo foi menor comparado com a condição a seco;
- O mecanismo de desgaste predominante nas brocas foi abrasivo, principalmente nas pontas das ferramentas e na aresta principal, além disso, houve a ocorrência de lascamentos na aresta principal.

Este estudo contribuiu para se compreender melhor a influência dos parâmetros de corte: avanço, velocidade de corte e fluido de corte, na vida útil da ferramenta e nas grandezas de saída: rugosidade R_a , circularidade e variação do diâmetro interno.

5. REFERÊNCIAS

- NBR NM 172, 2000. *Critério de Classificação dos Aços*. 4 mai. 2021 <<https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/20774/abnt-nbrnm172-criterios-de-classificacao-dos-acos>>.
- NBR NM 87, 2000. *Aço carbono e ligados para construção mecânica - Designação e composição química*. 5 mai. 2021 <<https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/20809/nbrnm87-aco-carbono-e-ligados-para-construcao-mecanica-designacao-e-composicao-quimica>>.
- Novaski, O., 1996. *Contribuições ao processo de furação com brocas helicoidais*. Tese de Livre Docência, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo.
- Ferraresi, D., 2003. *Fundamentos da Usinagem dos Metais*. Edgard Blucher, São Paulo, 11ª edição.
- Diniz, A. E., Marcondes, P. e Coppini, N. L., 1999. *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*. MM Editora, São Paulo, 1ª edição, 1ª reimpressão.
- Diniz, A. E., Marcondes, P. e Coppini, N. L., 2003. *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*. MM Editora, São Paulo, 1ª edição, 4ª reimpressão.
- Machado, Á. R., Abrão, A. M., Coelho, R. T. e Silva, M. B., 2003. *Teoria da Usinagem dos Materiais*. Blucher, São Paulo, 2 edição.

- Dimla, D. E., 2004. *The Impact of Cutting Conditions on Cutting Forces and Vibration Signals in Turning with Plane Face Geometry Inserts*. 2 mai. 2021 <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924013604005096>>.
- De Castro, P. R. A., 2021. *Aspectos tecnológicos da usinagem a seco e com mínima quantidade de fluido de corte na furação com broca helicoidal*. Tese de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Montgomery, D. C. e Runger, G. C., 2009. *Estatística Aplicada e Probabilidade Para Engenheiros*. Livros Técnicos e Científicos Editora, 4ª edição.
- Marques, F., 2021. *Avaliação do desempenho de brocas helicoidais de aço rápido revestidas na usinagem de ferro fundido nodular GGG50*. Tese de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Oliveira, V. V., 2008. *Influência da geometria de brocas na furação do ferro fundido vermicular*. Tese de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

ANALYSIS OF THE GEOMETRIC DEVIATIONS AND WEAR OF THE TOOL IN THE DRILLING PROCESS OF AN AISI 1045 STEEL WITH HARD STEEL HELICOID DRILL

Irvin William Da Silva Canuto¹

Armando Marques²

André Gustavo de Sousa Galdino³

Mario Cezar dos Santos Junior⁴

Cleudes Guimarães⁵

Luciano Antônio Fernandes⁶

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo (IFES) – Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Vitória, 1729 - Jucutuquara, Vitória - ES, 29040-780.

¹irvin.william@hotmail.com, ²amarques@ifes.edu.br, ³andreg28@gmail.com, ⁴mcezarjr@ifes.edu.br,

⁵cleudes@iftm.edu.br, ⁶luciano.fernandes@uftm.edu.br

Abstract. The drilling operation is used in numerous parts of the industrial sectors being produced mostly with the aid of helical drills. Therefore, it is important to understand the geometric deviations of holes and tool wear in this machining process. That said, the present work aimed to study the influence of cutting parameters, such as: cutting speed (V_c), feed (f) and lubri-cooling in the drilling process of AISI 1045 steel with high-speed steel twist drills in order to seek an optimization of the process having as indicators for analysis: roughness R_a , variation of the internal diameter and circularity of the holes, as well as the maximum flank wear of the tools (VB_{max}). To carry out the experiments, eight helical drills were used and 56 specimens with a square section were prepared with a hole depth of 25.4 mm through the CNC machining center, with adaptation for the use of a minimum quantity lubricant pump (MQL), applied through nebulization. It was established to evaluate the wear generated in the tool after making 84 holes, in each tool, through a stereomicroscope for image acquisition and through the Leica LAS EZ software to measure the maximum flank wear of the tools in the photos. To measure the roughness R_a , a rugosimeter was used and to measure the variation in the internal diameter and roundness, a coordinate measuring machine was used. In each measurement of each parameter, three readings were taken in three different regions of the hole to obtain the standard deviation, dispersion of the results and the accuracy of the measured holes. For the analysis of the results obtained, the factorial planning methodology was used, which uses the combination of factors (k) analyzed in 2 levels of variation. For this work, three factors were chosen, therefore the number of combinations was equal to 8 different scenarios. With this, it can be concluded that: the advance followed by the cutting speed were the input parameters that most influenced the output variables: roughness, roundness and internal diameter variation, while lubrication had no significant influence; the best geometric quality of circularity and roughness of the holes was obtained with the second condition; the smallest variation of measurement of the internal diameter was using the third condition, as it had the smallest deviation of the internal diameter compared to the nominal diameter of 10 mm; and the predominant wear mechanism in the drills was abrasive.

Keywords: Drilling process. Twist drill. Geometric deviations. Tool wear. Minimum amount of lubrication

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.