INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA BROCA NOS ESFORÇOS DE FURAÇÃO

Lucas Henrique Oliveira Espanhol, PUCPR , lucasespanhol10@gmail.com
Lucas Henrique Correia Pires, PUCPR, lucaspires1098@gmail.com
Taynan Lucas Caitano, PUCPR, taynanlucas@gmail.com
Fábio Rustow de Paula, PUCPR, fabio.rustow@pucpr.edu.br
Álisson Rocha Machado, PUCPR, Alisson.rocha@pucpr.br

Resumo.
Este trabalho investiga a influência da alteração de parâmetros geométricos da broca de metal duro nos esforços de furação de aço SAE 4144M, visando encontrar uma geometria mais adequada que a broca de referência, atualmente utilizada no chão de fábrica de uma empresa do ramo automobilístico, parceira no projeto. Os ensaios de furação foram desenvolvidos em diferentes condições de avanço e de velocidade de corte (variação em 2 níveis cada), utilizando 6 brocas com diferentes geometrias de canais e dimensões da guia cilíndrica. Uma das brocas é a geometria de referência. Foram monitorados a força de avanço e o torque, por meio de um dinamômetro Kistler. Os resultados indicaram que a geometria do canal "C" apresentou os menores valores de força de avanço, e que as dimensões da guia cilíndrica influenciaram o torque significativamente, onde as menores guias (0,3 mmm) geraram menores valores. Estes resultados indicam que um refino ainda mais elaborado da geometria da broca pode contribuir para aumentar a eficiência do processo.

Palavras-chave: Palavras-chave: *broca helicoidal, guia cilíndrica, aço SAE4144M, geometria de canal, condições de corte.*

1. INTRODUÇÃO

A performance de uma ferramenta com geometria definida está diretamente relacionada a suas características geométricas. O processo de furação com brocas helicoidais (Figura 1) ocorre pela ação das arestas principais e da aresta transversal que se torna uma parte integrante da aresta principal, mesmo que em decorrência do ângulo de saída negativo e posicionado no centro da broca. A aresta transversal praticamente não atua no corte, e sim na deformação do material, extrudando-o na direção das parcelas cortantes da aresta principal, (Schroeter e Teixeira, 2000), demonstrando a correlação direta da retirada de material com a afiação da ferramenta.



Figura 1 – Broca helicoidal com haste cilíndrica
Fonte: Boeira, 2010

Uma forma para melhorar o rendimento é a alteração das geometrias das brocas. Segundo Diniz et al. (2014) e Trent e Wright (2000), uma boa afiação pode reduzir temperatura, força e potência de usinagem e o desgaste, com consequente aumento na vida da ferramenta, além de melhorar o acabamento superficial.

O aço ABNT 4144M é um material que se destaca por suas propriedades singulares e sua versatilidade em diversas aplicações industriais. Com uma composição química balanceada que inclui elementos como cromo, molibdênio e níquel, esse tipo de aço exibe uma notável resistência mecânica e dureza, tornando-o ideal para aplicações que requerem alta resistência ao desgaste e tração. Sua capacidade de ser temperado e revenido contribui para o desenvolvimento de peças robustas e duradouras, frequentemente encontradas em componentes de máquinas, engrenagens e eixos de transmissão (Caitano, 2019). A usinabilidade do aço SAE 4144M, incluindo o desempenho na furação, é uma consideração importante, sendo fundamental levar em conta fatores como a velocidade de corte, o avanço, geometria da ferramenta e a lubrificação adequada.

Este trabalho foi motivado por sugestão da empresa parceira, buscando encontrar solução de melhorias de processos, neste caso a furação do aço SAE 4144M, que é sempre um desafio. O objetivo principal é analisar a influência do tamanho da guia cilíndrica e da geometria do canal da broca nos esforços de furação (força de avanço e torque), com brocas de metal duro revestidas, identificando a geometria que oferece melhor desempenho.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O material da peça utilizado para os testes de furação é de aço SAE 4144M, forjado, temperado e revenido, empregado na indústria automobilística. Os corpos de prova foram previamente preparados, sendo faceados e esquadrejados para boa fixação na base do dinamômetro. Possui uma estrutura martensítica revenida e dureza média de 38,15 HRC.

Os ensaios de furação a seco foram realizados no Laboratório de Pesquisa em Usinagem (LAUS) da PUCPR, no centro de usinagem Cincinnati Milacron Arrow 500, com 5,5 kW de potência e rotação máxima de 6000 rpm. Foram

realizadas tréplicas de ensaios de furação para cada broca. Todos os testes foram com brocas de metal duro classe K40 revestidas com Durana (AlTiN + TiSiXN), fabricadas pela empresa parceira, sem a utilização de fluído de corte. As brocas utilizadas para os ensaios de furação foram variadas em espessura de guia cilíndrica e geometria de canal, conforme Tab. (1).

Os valores de velocidades de corte e avanço das ferramentas foram definidos em dois níveis, dentro da faixa de trabalho especificada pelo fabricante e considerando também os valores utilizados no chão de fábrica da empresa parceira, 80 e 120 m/min e 0,05 e 0,107 mm/rev; respectivamente. O comprimento do furo (percurso de avanço) foi estipulado em 20 mm e as variáveis de saída consideras foram a força de avanço e o torque.

Tabela 1 – Identificação das brocas estudadas

Broca	Espessura das guias [mm]	Geometria do canal
A	0,3	X
B	0,3	Y
C	1,3	X
D	1,3	Y
E	0,8	Y
F	0,8	Z

Fonte: (Autor)

Para a realização desse estudo a espessura das guias foi variadas em 0,3; 0,8 e 1,3 mm e a geometria do canal em X, Y e Z, conforme mostrado na Fig. (2). A broca atualmente utilizada na empresa parceira possui espessura das guias de 0,8 mm e geometria de canal Y, Boca E da Tabela 1. Sendo assim, foi realizado um estudo para definir como a espessura das guias, uma menor (0,3 mm) e outra maior (1,3 mm) que a utilizada atualmente, e a geometrias de canal (X), atual (Y) e (Z), conforme Fig. 2, influenciam nos esforços de usinagem durante o processo de furação.

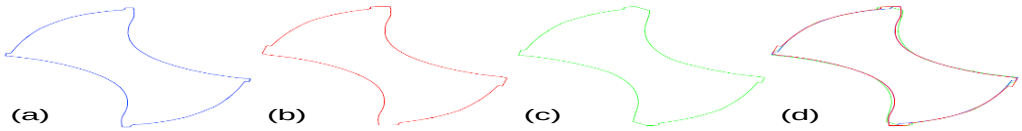


Figura 1 – Seção transversal das brocas - (a) Geometria X; (b) Geometria Y; (c) Geometria Z; (d) Geometrias sobrepostas.

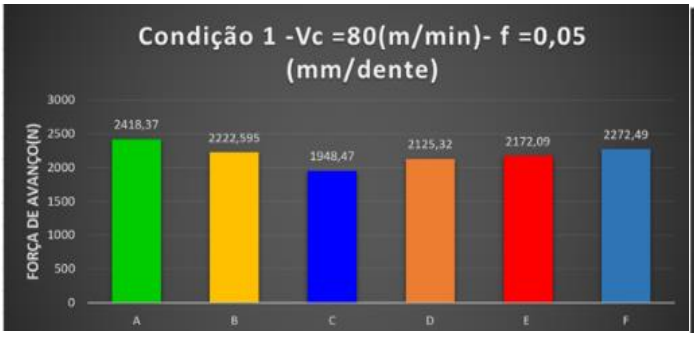
Para os testes, o corpo de prova foi fixado na plataforma dinamométrica, modelo 9272, acoplado em um amplificador, modelo 5070, e este a uma placa de aquisição de dados, modelo 5697A, gerenciado pelo software Dynoware®, versão 2.6.3.12, todos do fabricante Kistler Instrument. Foi utilizada uma broca nova nas quatro condições de corte (velocidade de corte e avanço em dois níveis) iniciais, outra na réplica e outra na tréplica, sem que em nenhuma ocasião o desgaste de flanco máximo atingiu 0,1 mm, evitando assim a influência do desgaste da broca nos resultados. A frequência de aquisição dos sinais de força de avanço e torque foi de 1000 Hz, durante todo o período de corte para execução do furo e a média dessas medições consideradas como resultado de cada furo. Como houve 3 repetições, o resultado da força de avanço e torque considerados foi a média geral desses ensaios.

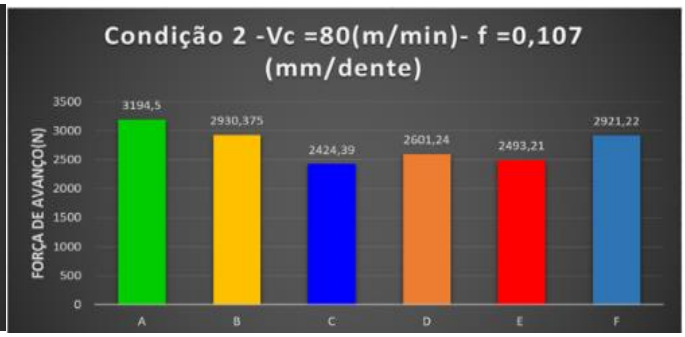
3. RESULTADOS

A Figura 3 apresenta os resultados das forças de avanço para as 6 brocas nas quatro condições de corte utilizadas.

Observa-se que a geometria C apresentou os menores valores de força de avanço entre todas as brocas testadas. As maiores forças foram observadas na furação com as brocas de geometria A e B.

A força de avanço é fundamentalmente dependente da aresta transversal da broca, chegando a ser responsável por aproximadamente 70 % do valor desta variável (Boeira, 2010). A aresta transversal das seis brocas testadas não foi alterada, portanto, as diferenças observadas, são creditadas à guia cilíndrica e a geometria dos canais. Observa-se, portanto, que mesmo com maior valor de guia cilíndrica, a geometria C favoreceu a força de avanço.





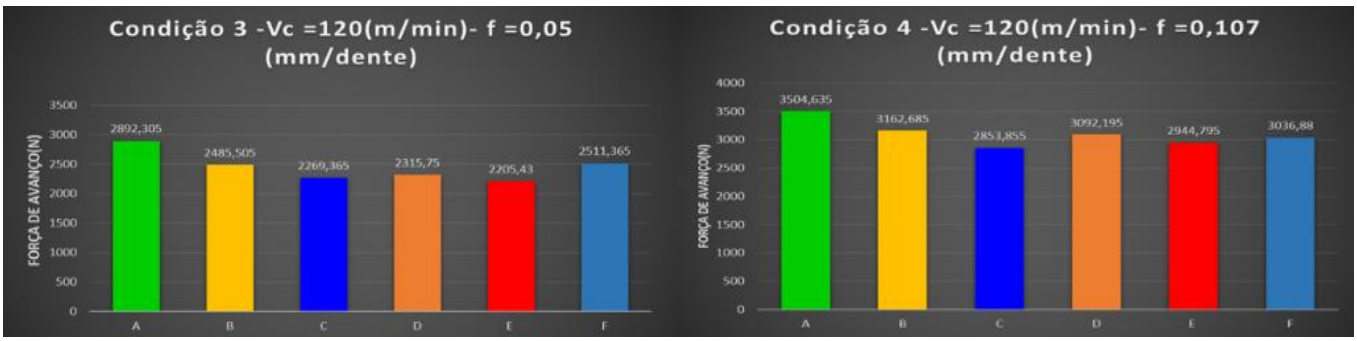


Figura 3 – Resultados das forças de avanço obtidas pelas diversas geometrias de brocas, nas 4 condições de corte testadas. Fonte: (Autor)

Para conferir a influência das variáveis de entrada na força de avanço, com confiabilidade estatística, foi feito ANOVA – Análise de Variância, usando o software 12.0, considerando um índice de confiabilidade de 95% e nível de significância de 5%. Os resultados são apresentados na Tabela 2. Observa-se que apenas a variável avanço não apresentou uma influência significativa na força de avanço (p-valor > 0,05). Todas as demais variáveis se mostraram significativamente influentes.

Tabela 2 – ANOVA da força de avanço

Effect	SS	Degr. of	MS	F	p
Intercept	125780691	1	125780691	64,55658	0,000000
Vc [m/min]	9313153	1	9313153	4,77995	0,043068
f [mm/rev]	7049001	1	7049001	3,61788	0,074244
Espessura da guia [mm]	19820649	2	9910324	5,08645	0,018564
Geometria de canal	16685971	2	8342986	4,28201	0,031187
Error	33122443	17	1948379		

Fonte: (Autor)

Para entender o comportamento das variáveis, os gráficos de tendências são apresentados na Figura 4. Observa-se que ao aumentar a velocidade de corte do nível inferior (80 m/min) para o superior (120 m/min), a força de avanço aumenta. Isto ocorre, provavelmente porque a velocidade de avanço aumenta com a rotação. Apesar do avanço não apresentar influência significativa, há a tendência de aumentar a força com o aumento desta variável. Isto se deve ao aumento da a área da seção de corte e a velocidade de avanço. Com relação a guia cilíndrica, os dois primeiros níveis (0,3 mm e 0,8 mm) apresentam valores de força de avanço similares, mas ao nível de 1,3 mm, há a tendência de aumento significativo na força. As geometrias X e Y apresentam valores de força de avanço similares, mas a geometria Z reduz consideravelmente esta variável, conforme observado na Figura 4.

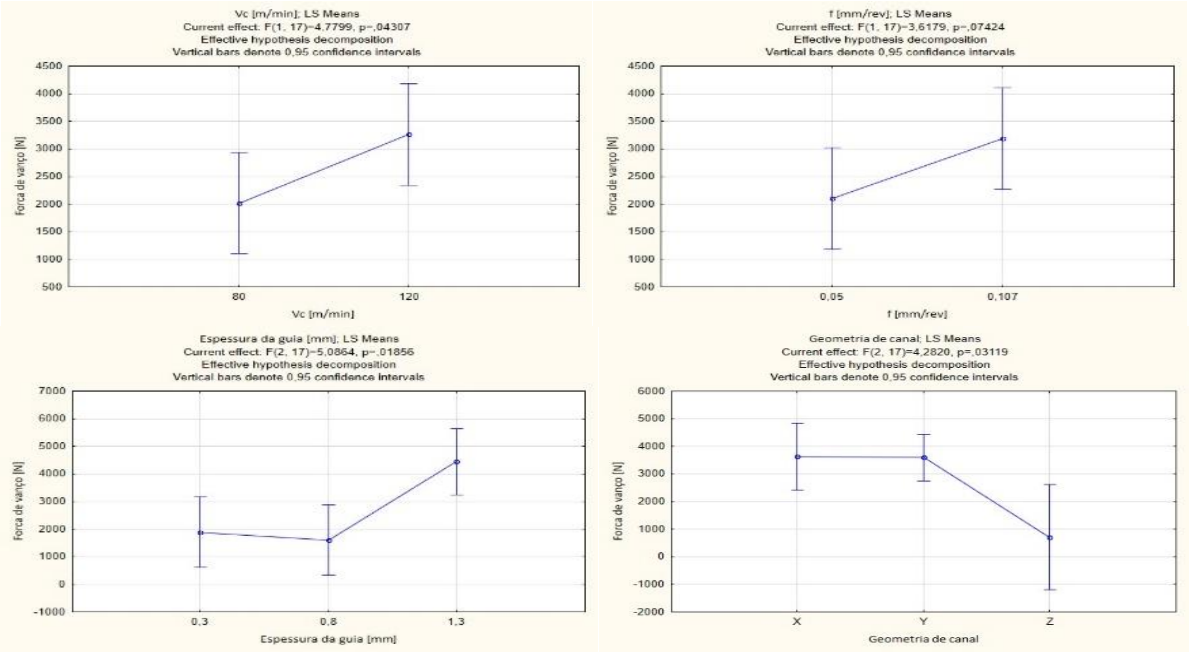


Figura 4 - Gráfico de tendências da força de avanço. Fonte: (Autor)

De acordo com diversos autores, entre eles Diniz et al., (2014) e Trent e Wright (2000), as alterações na geometria da ferramenta afetam o resultado da furação, sendo que sempre existirá uma geometria ideal onde melhorias serão observadas, como a diminuição da força de avanço e torque. A redução dos esforços, resulta em menor tensão sobre a ferramenta, ao mesmo tempo em que reduz oscilações e vibrações provenientes do maquinário, melhorando a qualidade do furo. Essa diminuição dos esforços também protege a peça, a ferramenta e o maquinário.

A Figura 5 apresenta os resultados do torque para as 6 brocas nas quatro condições de corte utilizadas. Como pode ser visto nos gráficos, as brocas que apresentam valores de torque inferiores são as geometrias A e B, em todas as condições de corte testadas, com valores bem inferiores ao da broca de referência, ou que vem sendo utilizada no chão de fábrica da empresa parceira, a geometria E. A geometria que apresentou maiores valores de torque é a geometria D. O torque é dependente direto da força de corte, recebendo grande influência do tamanho da guia cilíndrica, ou seja, menores valores de guia cilíndrica, implica em menores torques.

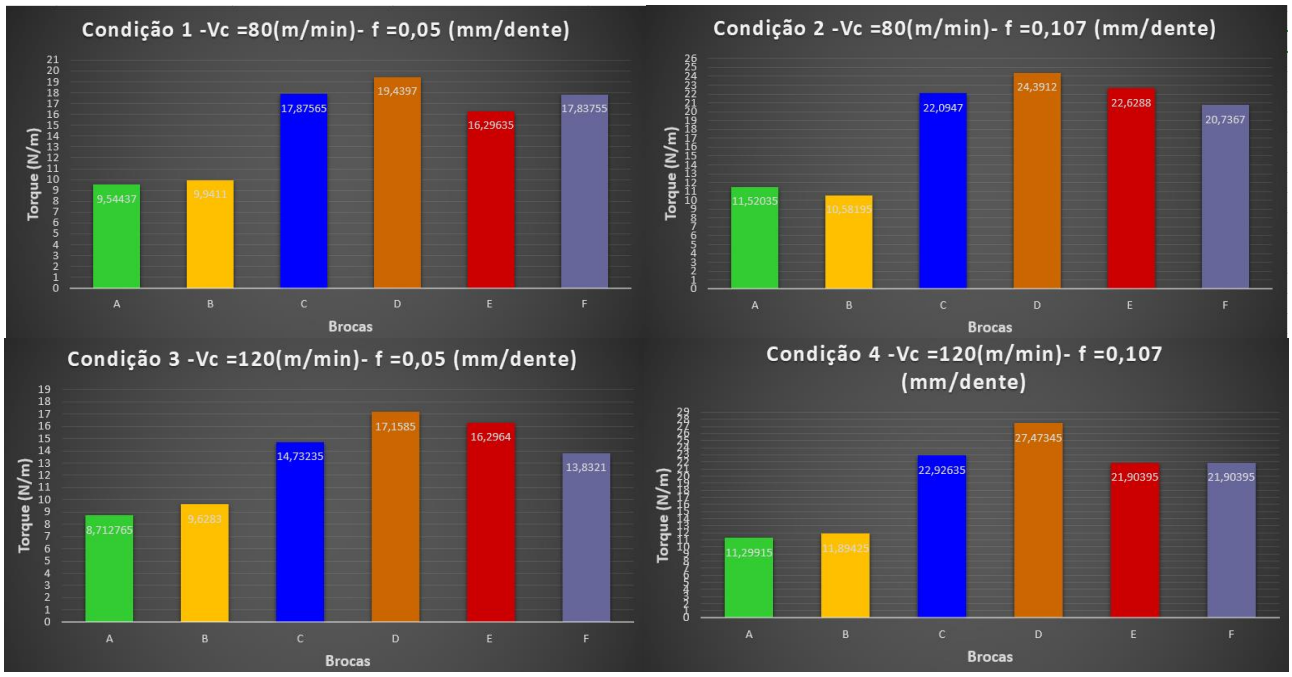


Figura 5 – Resultados do torque obtidos pelas diversas geometrias de brocas, nas 4 condições de corte testadas. Fonte: (Autor)

Para conferir a influência das variáveis de entrada no torque, com confiabilidade estatística, foi feito ANOVA – Análise de Variância, considerando um índice de confiabilidade de 95% e nível de significância de 5%. Os resultados são apresentados na Tabela 3. Observa-se que velocidade de corte e a geometria de canal não apresentaram influências significativas. Em contrapartida, o avanço e a espessura da guia apresentaram influência.

Tabela 3 – Resultado de ANOVA para o torque.

Effect	SS	Degr. of	MS	F	p
Intercept	5044,771	1	5044,771	1334,107	0,000000
Vc [m/min]	0,414	1	0,414	0,109	0,744876
f [mm/rev]	150,179	1	150,179	39,715	0,000008
Espessura da guia [mm]	453,736	2	226,868	59,996	0,000000
Geometria de canal	8,795	2	4,397	1,163	0,336244
Error	64,284	17	3,781		

Fonte: (Autor)

Para entender o comportamento das variáveis, os gráficos de tendências do torque são apresentados na Figura 6. Observa-se que ao aumentar a velocidade de corte do nível inferior (80 m/min) para o superior (120 m/min), há uma ligeira tendência de reduzir ao torque. Isto ocorre pela maior geração de calor, favorecendo a redução da força de corte e, consequentemente do torque. O torque é fortemente sensível à mudança do avanço. Ao aumentar o avanço, há a tendência de aumentar o torque. Isto ocorre por alterar a espessura do cavaco e a área da seção de corte. Com relação a guia cilíndrica, o aumento desta variável tende a aumentar o torque. A geometria de canal não se mostrou uma variável significativamente influente no torque, mas a tendência é que o torque aumente ao passar da geometria X para Y e a mudança para a geometria Z, praticamente não altera esta variável de saída.

De acordo com Boeira, (2010), a alteração da geometria da broca vai influenciar as forças passivas que ajudam a eliminar eventuais vibrações. Assim, a alteração feita na geometria da broca é responsável pela diminuição no torque proporcionado pela geometria X, melhorando o processo, pois quanto maior o torque da ferramenta maior a vibração gerada no sistema.

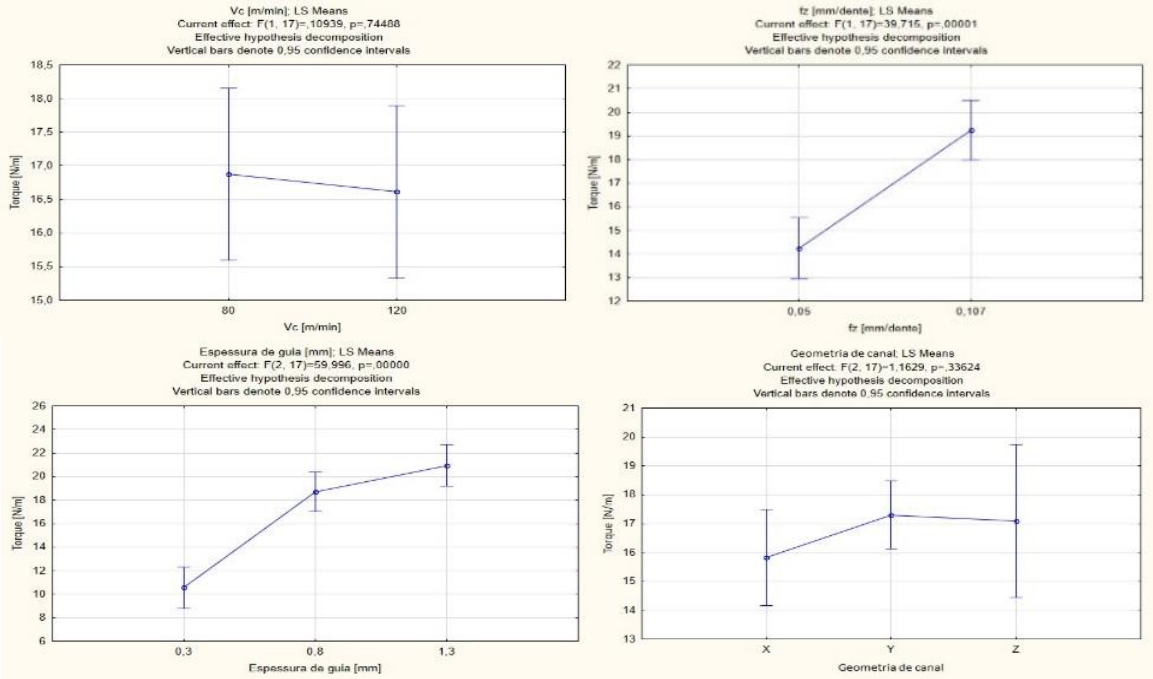


Figura 6 – Gráficos de tendências do torque. Fonte: (Autor)

Os resultados do torque e força de avanço apresentam dispersão em seus valores, o que é inerente ao processo de formação do cavaco, que ocorre ciclicamente, em etapas que envolve, deformação elástica, deformação plástica, ruptura e escorregamento de lamelas na superfície de saída da ferramenta (Machado et al., 2025). Assim, a utilização de ferramentas estatísticas é fundamental para elucidar as influencias das variáveis com índice de confiabilidade elevado, neste caso o emprego de ANOVA com índice de confiabilidade de 95%.

4. CONCLUSÕES

As geometrias A e B, com os menores valores de guia cilíndrica apresentaram os maiores valores de força de avanço e os menores torque. Este resultado é em função da força de avanço depender mais da aresta transversal, que não foi alterada nas 6 geometrias testadas, evidenciando que as geometrias X (broca A) e Y (broca B) dificultam a penetração da broca, no sentido do avanço. Em contrapartida, essas geometrias favoreceram componente de força na direção de corte, pois apresentaram os menores valores de torque. O aumento da guia cilíndrica, tem a tendencia de aumentar tanto a força de avanço como o torque.

5. REFERÊNCIAS

Boeira, A.M.G., Modelagem e simulação das forças na furação com brocas helicoidais a partir de dados obtidos no torneamento de segmentos cilíndricos, Tese de doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mercânica, UFSC, Florianópolis/SC, 2010.

Caitano, T., Furação de aço SAE4144M com Brocas Helicoidais de Metal Duro Preparadas Com Diferentes Processos de Polimento. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica**,** Pontifícia Universidade Católica do Paraná - PUCPR, Curitiba/PR, 2019, 151 p.

Diniz, A.E., Marcondes, F. C., Coppini, N. L., “Tecnologia da usinagem dos metais”, Artliber Editora, São Paulo, 9ª Edição, 2014.

Machado, A.R., Abrão, A.M., Coelho, R. T., Da Silva, M. B., “Teoria da usinagem dos metais”, 3ª Edição, Editora Edgard Blucher, São Paulo, 2015, 407p.

Schroeter, R. B., Teixeira, C. R. Proposta de metodologia para medição do desgaste em ferramentas de corte de geometria definida. Anais do CONEM 2000 - Congresso Nacional de Engenharia Mecânica – CONEM, Natal. 9 p. 2000

Trent. E.M; Wright, P.K., Metal Cutting, 4th Edition, Butterworths, London, 2000.