

Análise do erro de circularidade em um material compósito sanduíche por meio da Análise de Variância (ANOVA)

Michele Lisboa Silveira (Universidade Federal de Minas Gerais) michelesilveira1991@gmail.com
Bruna Aparecida Rezende (Universidade Federal de Minas Gerais) brunarezende12@yahoo.com.br
Juan Carlos Campos Rubio (Universidade Federal de Minas Gerais) juan@ufmg.br
Paulo Eustáquio de Faria (Universidade Federal de Minas Gerais) paulofaria@ufmg.br

Resumo

Diversos materiais são conhecidos e utilizados na indústria, com destaque para metais, polímeros e cerâmicas. Entretanto, a combinação destes materiais tem sido importante para a criação de produtos com características específicas. Entre os vários materiais utilizados para a concepção de produtos finais, os painéis sanduíche desempenham uma função importante devido a algumas propriedades, como baixo peso, rigidez e resistência elevada. Os materiais podem passar por diferentes operações de usinagem durante seu processamento, como a operação de furação, que é abordada neste trabalho. Com isso, pretendeu-se estabelecer a relação existente entre a geometria de corte de diferentes brocas e seus efeitos na furação de um painel sanduíche de alumínio e polietileno. Foram utilizadas as brocas *Brad & Spur*, helicoidal com duas arestas e helicoidal com três arestas, empregando velocidades de corte de 24, 48 e 72 m/min, e avanços de 0,05, 0,10, 0,15 e 0,25 mm/rev. Foi analisado o erro de circularidade, importante para garantir qualidade dos furos. A broca que obteve menor erro de circularidade foi a helicoidal com duas arestas. Durante a apresentação e discussão dos resultados, interpretou-se como a geometria das brocas influenciou em cada resultado obtido.

Palavras chave: Painéis Sanduíche, Furação, geometria da ferramenta de corte, circularidade.

Analysis of the circularity error in a sandwich composite material by means of Analysis of Variance (ANOVA)

Abstract

Various materials are known and used in industry, especially metals, polymers and ceramics. However, the combination of these materials has been important for the creation of products with specific characteristics. Among the various materials used for the final product design, sandwich panels play an important role due to some properties such as low weight, stiffness and high strength. The materials can undergo different machining operations during their processing, such as the drilling operation, which is discussed in this paper. Thus, it was intended to establish the relationship between the cutting geometry of different drills and their effects on the drilling of an aluminum and polyethylene sandwich panel. The Drills *Brad & Spur*, twist drill with two edges, twist drill with three edges were used, employing cuttings speed of 24, 48 and 72 m/min and values for the feed rates of 0,05, 0,10, 0,15 and 0,25 mm/rev. Circularity error was analyzed, important to guarantee the quality of the holes. The drill that obtained less circularity error was the helicoidal with two edges. During the presentation and discussion of the results, it was interpreted how the geometry of the drills influenced each result obtained.

Key-words: sandwich panels, drilling, geometry cutting tool, circularity.

1. Introdução

Diante de acentuados níveis de desenvolvimento técnico e científico, as organizações têm buscado utilizar Sistemas Integrados de Manufatura em suas operações. Desde a fase da administração científica de Taylor já havia a preocupação em analisar os processos produtivos com o intuito de otimizar os resultados de produção e qualidade.

Para a indústria metal-mecânica, busca-se produzir materiais cada vez mais sofisticados, com características tais que permitam aplicabilidade em condições especiais de operação. Existem inúmeros materiais utilizados na produção industrial, dentre eles, os materiais compósitos e estruturais. Estes desempenham uma função importante, por serem materiais leves quando comparados aos materiais metálicos.

Wennberg (2011) considera painéis sanduíche como materiais compostos por três elementos principais - duas faces externas e um núcleo central. As faces do material sanduíche são normalmente chapas metálicas ou plásticos reforçados com fibras, ou seja, materiais de alto desempenho. Os materiais do núcleo são de baixa densidade, como polímeros, madeiras e colmeias. Visto que os materiais sanduíche são constituídos de dois diferentes materiais, diferentes configurações podem ser encontradas na indústria, e o estudo de seu processamento permite o fornecimento de informações para um planejamento de produção futuro.

Os materiais sanduíche para serem aplicados na indústria devem passar por processos de fabricação, como a usinagem. Segundo Machado *et al.* (2015), a usinagem é descrita da seguinte forma: “processo complexo e simples ao mesmo tempo, no qual se produzem peças removendo-se o excesso de material na forma de cavacos”. A usinagem é considerada complexa devido a dificuldades em determinar as condições ideais de corte. Ao mesmo tempo é simples, pois pode dispensar intervenções dos operadores. Entre as operações de usinagem, tem-se a furação, fresamento, torneamento, roscamento, alargamento, brochamento, serração, aplainamento, entre outros. Esta pesquisa consiste no estudo da operação de furação de um material sanduíche.

A operação de furação pode acarretar diversos problemas no furo, como erro de circularidade, formação de rebarbas, delaminação, defeitos por temperatura, ou outras características inerentes ao processo. Neste trabalho será analisado o erro de circularidade utilizando-se brocas com geometrias diferentes.

Aliado ao processo efetivo de usinagem, análises estatísticas são de fundamental importância para interpretar os resultados de uma operação. Nesse sentido, busca-se aplicar a ferramenta de Análise de Variância (*Analysis of Variance* -ANOVA) para analisar a influência dos parâmetros de corte e geometria da ferramenta na qualidade do furo, sobre a resposta de circularidade. Menores erros de circularidade são desejáveis, pois implicam maior qualidade e conformidade aos furos.

2. Furação de materiais sanduíche

Embora as peças em materiais sanduíche sejam produzidas na forma quase final, a usinagem torna-se fundamental devido à necessidade em cumprir tolerâncias de montagem. Em algumas situações, furos são realizados para possibilitar a ligação de peças em estruturas. A operação que permite a ligação por parafusos, rebites ou cavilhas é a furação (DURÃO *et al.*, 2013).

De acordo com a norma DIN 8589 (2003), a furação é definida como uma operação de usinagem com movimento de corte circular, ou seja, com movimento rotativo principal. A ferramenta possui movimento de avanço apenas na direção do seu eixo de rotação, que mantém sua posição em relação à ferramenta e à peça.

A broca helicoidal é a ferramenta mais utilizada para a produção de furos (Stemmer, 2001), podendo ser encontrada no mercado com diferentes formas geométricas. Brocas helicoidais com diferentes geometrias são usadas para a furação de materiais estruturais, como a helicoidal, escalonada e Brad & Spur, conforme a Figura 1.

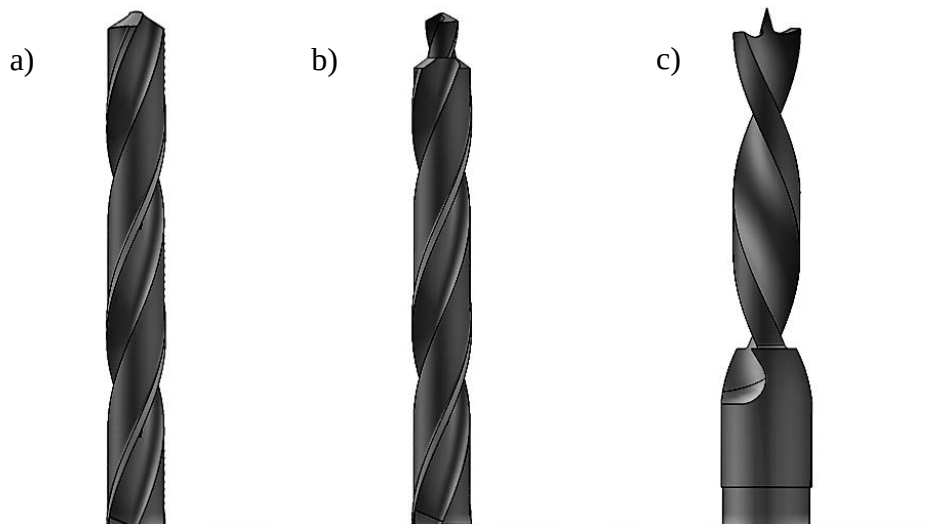


Figura 1 - Brocas com geometrias diferentes: (a) helicoidal, (b) escalonada, (c) Brad & Spur

Brocas como a Brad & Spur são aplicadas na furação de materiais compostos, principalmente quando as placas superiores são de materiais dúcteis. Muitos estudos abordam sua aplicação em usinagem de alumínio, com o objetivo de reduzir a formação de rebarbas na saída do furo (WEINGAERTNER e SCHROETER, 1990). Os autores consideram ainda que, se uma broca comum for utilizada para furação de chapas finas de material dúctil, como o alumínio, a região próxima ao furo pode ficar deformada e o furo não sairá circular. Este problema pode ser resolvido afiando-se a broca com um ângulo de ponta entre 150° e 180° , com uma pequena ponta no centro que ultrapasse a espessura da chapa em 1 a 2 mm. Seria o caso da broca Brad & Spur, cuja geometria adequa-se para furação de chapas de alumínio.

A broca Brad & Spur empurra o furo da periferia para o centro, mantendo sua forma e evitando o amassamento da chapa. Weingaertner e Schroeter (1990) complementam ainda que a velocidade de corte deve ser alta, e o avanço, baixo, quando comparado à furação normal, a fim de permitir uma entrada mais suave da broca na chapa.

Segundo Faria (2007), a geometria das ferramentas de corte pode influenciar a operação de furação, porque a forma como a aresta de corte cisalha o material depende muito da interface peça-ferramenta, que é determinada pela geometria da cunha de corte. O autor estudou a furação de um compósito de resina epóxi reforçado com fibras de vidro utilizando brocas com geometrias diferentes, e, entre elas, a broca helicoidal com três arestas.

2.1 Circularidade

O erro de circularidade é medido para avaliar a qualidade do furo. A circularidade é a zona de tolerância delimitada por dois círculos concêntricos em que o perfil real apresentado pelo furo deve se situar. Calcula-se o erro de circularidade pela diferença dos diâmetros D e d dos círculos concêntricos (ASME Y14, 1994). Ele está representado na Figura 2.

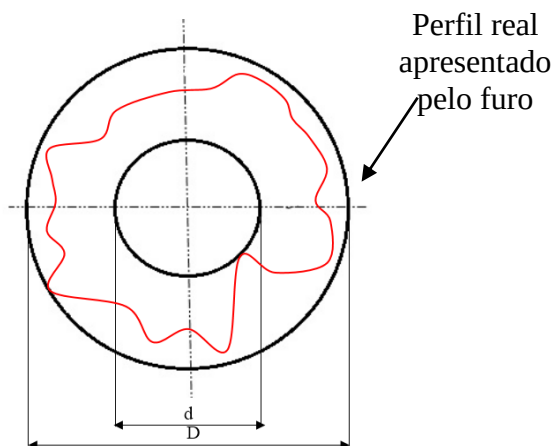


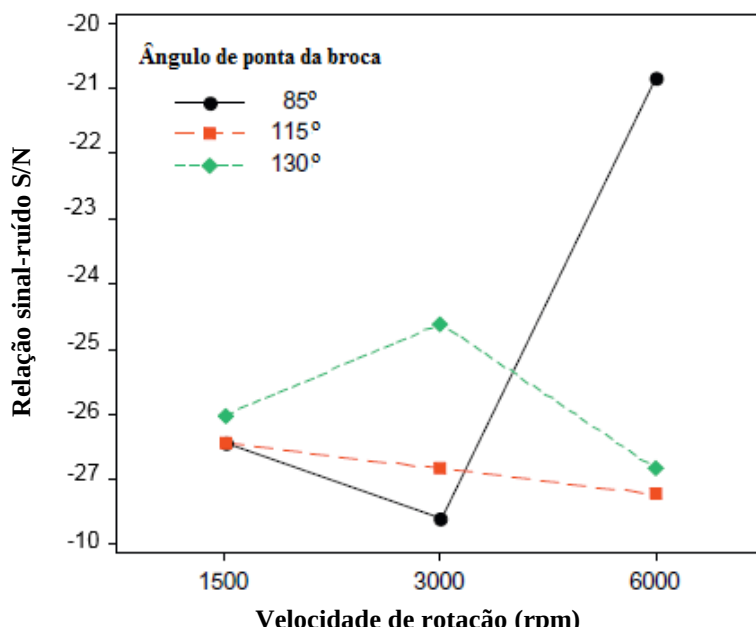
Figura 2 - Erro de circularidade

Zitoune *et al.* (2010) investigaram o efeito do diâmetro da broca, velocidade de corte e avanço sobre a força de avanço, torque, acabamento da superfície, circularidade e diâmetro do furo na furação de plástico reforçado com fibra de carbono/Al utilizando brocas de metal duro (K20).

Foi observado aumento da circularidade com o aumento do avanço, enquanto a velocidade de corte não afetou significativamente o acabamento do furo. Este comportamento foi atribuído a uma maior quantidade de material retirado por volta, o que aumentou a seção transversal do cavaco e a força de avanço.

Rubio *et al.* (2013) avaliaram o erro de circularidade na furação de poliamida sem reforço (PA6) utilizando brocas de metal duro (K20) com ângulos de ponta de 85°, 135° e 115°. O método Taguchi foi aplicado para relacionar a circularidade ao sinal ruído (S/N), conforme a Figura 3.

O menor erro de circularidade observado foi para a broca com ângulo de ponta 85° e velocidade de rotação de 3000 rpm. A velocidade de rotação foi o parâmetro que mais afetou o erro de circularidade, seguido pelos fatores avanço e ângulo da broca.



Fonte: RUBIO *et al.*, 2013

Figura 3 - Interação sinal-ruído obtida para o erro de circularidade

3. Análise de variância

A presente pesquisa visa comparar vários grupos de interesse, e a ferramenta estatística utilizada foi a ANOVA – análise de variância (*analysis of variance*). A ANOVA compreende um planejamento experimental no qual busca-se a avaliação da influência de diferentes fatores sob uma variável resposta. Um experimento planejado é um teste – ou uma série de testes – onde mudanças propositalmente são feitas em variáveis de entrada de um processo de modo a se observar mudanças correspondentes nas variáveis de saída (MONTGOMERY, 2009).

Montgomery (2009) considera ainda que experimentos fatoriais são utilizados quando se deseja tratar dois ou mais fatores simultaneamente para o conhecimento de níveis ótimos de operação de cada fator. Já quando existem vários fatores de interesse em um experimento, um planejamento fatorial se faz necessário. Neste caso, todas as combinações possíveis dos níveis dos fatores estudados devem ser promovidas no experimento. O efeito de um fator é definido como a mudança em seu nível.

Os dados utilizados na análise de variância devem refletir a influência de mudanças ocorridas nos fatores (causas) de interesse sobre a variável de resposta (característica da qualidade) (WERKEMA *et al.*, 1996).

No estudo em questão, foi avaliada a influência dos fatores ferramenta, velocidade de corte e avanço no erro de circularidade. A Tabela 1 representa a saída para a análise de variância para um experimento de um fator.

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Média Quadrática	F
Tratamentos	a-1	SQTratamentos	MQTratamentos	MQTratamentos
Erro	a(m-1)	SQE	MQE	MQE
Total	am-1	SQT		

Fonte: Montgomery (2009)

Tabela 1 – Análise de variância para um experimento de um fator

Onde:

SQ tratamentos = Soma dos quadrados dos tratamentos

SQE = Soma dos quadrados dos erros

SQT = Soma de quadrados total

MQ tratamentos = Média quadrática dos tratamentos

MQE = Média quadrática dos erros

Na análise de variância apresentada neste trabalho, os dados são apresentados de acordo com a tabela 1, com adição do valor p e da porcentagem de contribuição. A ANOVA foi feita com um nível de confiança de 95% e, para que existisse contribuição dos fatores individuais para a circularidade, os fatores deviam apresentar valor p menor que 0,05. Nos casos em que isto aconteceu, a porcentagem de contribuição de cada fator foi calculada por meio da equação 1 (OKASHA, 2011).

$$\text{Contribuição (\%)} = \frac{SQ_{\text{tratamentos}}}{SQ_T} \quad (1)$$

3.1 Verificação da Adequação da ANOVA – Análise de Resíduos

De acordo com Werkema *et al.* (1996), para a realização da análise de variância é necessário que a variável de resposta tenha uma distribuição normal, com a mesma variância para todos os tratamentos. Esta condição de igualdade de variâncias especifica que a “precisão” (variabilidade) das observações é a mesma em cada tratamento. Os autores consideram que, para a realização da análise de variância, também é preciso que sejam coletadas N observações independentes da distribuição associada ao i -ésimo tratamento. Além disto, as amostras de diferentes tratamentos devem ser extraídas de modo independente. Dessa forma, para que a análise de variância seja realizada, são necessários os aspectos de normalidade, igualdade de variâncias e independência.

Werkema *et al.* (1996) consideram que o modelo de análise de variância deve assumir observações independentes e normalmente distribuídas com a mesma variância para cada tratamento. A validade dessas suposições deve ser verificada por meio da análise de resíduos, sendo que um resíduo é definido de acordo com a equação 2:

$$e_{ij} = x_{ij} - \bar{x}_i \quad (2)$$

Onde:

e_{ij} = resíduo de ordem ij

x_{ij} = observação de ordem ij

$\bar{x}_i$ = média do tratamento i

Sabe-se que um resíduo é a diferença entre uma observação e a média do tratamento correspondente. A verificação da adequação ao modelo de análise de variância é feita por meio do estudo dos gráficos de resíduos, explicados na Tabela 2.

Gráfico	Para avaliar a validade da suposição de
Resíduos contra o tempo	Independência
Resíduos contra médias $\bar{x}_i$	Variância constante
Probabilidade normal para os resíduos	Normalidade

Fonte: Werkema *et al.* (1996)

Tabela 2 – Gráficos para análise de resíduos

No gráfico de resíduos contra o tempo, aqueles devem estar situados, aproximadamente, em torno de uma faixa horizontal centrada em $e_i = 0$ para indicar independência. Por outro lado, configurações especiais neste gráfico, tais como a presença de sequências de resíduos positivos e negativos ou padrões de alternância de sinais, podem indicar que as observações não são independentes.

No gráfico de resíduos contra as médias dos tratamentos, a dispersão dos resíduos deve ser observada. Ela não deve depender do valor da média $\bar{x}_i$. Se a faixa de dispersão no gráfico de resíduos contra as médias dos tratamentos depender do valor de $\bar{x}_i$, terá sido obtida uma indicação de que a suposição de igualdade de variâncias não é válida.

No gráfico de probabilidade normal para os resíduos, cada resíduo é representado em função

de seu valor esperado, o qual é calculado supondo-se que os resíduos sigam uma distribuição normal. Considera-se que a suposição de normalidade é válida se os pontos do gráfico estiverem localizados, aproximadamente, ao longo de uma linha reta.

4. Materiais e métodos

O material de trabalho consistiu em uma placa de material sanduíche constituída de duas faces externas de alumínio e polietileno de baixa densidade como núcleo. A representação esquemática deste material é mostrada na figura 4.

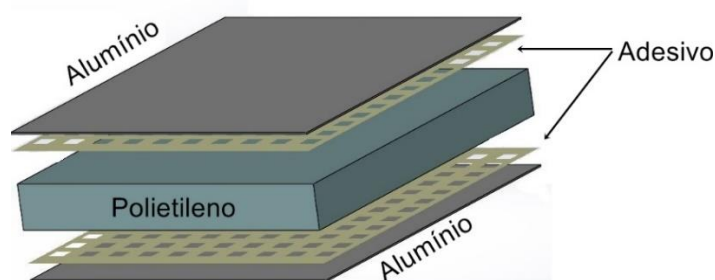


Figura 4 - PEALL

Empregou-se um planejamento fatorial completo, que permitiu o estudo de vários fatores, assim como a interação entre os fatores. Nesta pesquisa, foram considerados como fatores o tipo de broca, a velocidade de corte e o avanço, enquanto os níveis foram as diferentes características ou valores que os fatores possuíam. Os parâmetros utilizados são apresentados na Tabela 3.

O planejamento fatorial adequado às condições experimentais foi do tipo $3^2 4^1$, com dois fatores (velocidade de corte e tipo de broca) em três níveis (três valores para velocidade, três tipos de broca) e um fator (avanço) em quatro níveis (quatro valores de avanço). Houve, portanto, 36 combinações diferentes. Para cada condição de teste realizou-se uma réplica, totalizando 72 experimentos.

Símbolo	Fatores	Níveis			
		1	2	3	4
A	Ferramenta	Brad & Spur	Helicoidal com 02 (duas) arestas	Helicoidal com 03 (três) arestas	-
B	Velocidade de corte (m/min)	24	48	72	-
C	Avanço (mm/rev)	0,05	0,10	0,15	0,25

Fonte: Autor (2017)

Tabela 3 – Parâmetros do experimento

Após submissão do material de trabalho à operação de furação com diferentes parâmetros de corte e brocas, foi medida a circularidade dos furos. Nesta etapa, utilizou-se a máquina de medição por coordenadas TESA, modelo MICRO HITE 3D (Figura 5), equipada com software REFLEX SCAN (versão 1.2) com resolução de 0,01 μm .



Figura 5 - Máquina de medição por coordenadas TESA, MICRO HITE 3D

Foram medidos 8 pontos para cada furo, a fim de se obter maior precisão. O erro de circularidade foi medido no ponto médio da espessura do material, ou seja, a 2 mm da superfície do material.

5. Resultados e discussão

O objetivo desta seção foi analisar a influência dos parâmetros de corte e geometria da ferramenta na qualidade do furo, com relação à circularidade. Tendo em vista a extensão dos dados de circularidade, estes não são apresentados neste artigo, mas sim as análises estatísticas. A tabela 4 apresenta a análise de variância para os dados de circularidade, e o Gráfico 1 mostra os resíduos, indicando validade do modelo, já que os dados seguiram distribuição normal. Observou-se que os parâmetros influentes foram a geometria da ferramenta, o avanço e as interações ferramenta versus velocidade de corte e ferramenta versus avanço.

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	Valor F	Valor p	Contribuição
Ferramenta	2	37,629	18,815	14,77	<u>0,000</u>	15,3%
V_c	2	6,611	3,306	2,60	0,088	
f	3	28,950	9,650	7,58	<u>0,000</u>	11,2%
Ferramenta * V_c	4	37,366	9,341	7,34	<u>0,000</u>	15,2%
Ferramenta * f	6	56,125	9,354	7,35	<u>0,000</u>	22,9%
$V_c * f$	6	8,892	1,482	1,16	0,347	
Ferramenta * $V_c * f$	12	23,282	1,940	1,52	0,161	
Erro	36	45,843	1,273			
Total	71	244,698				
Resumo do modelo						
Desvio Padrão	R-sq	R-sq (adj)				
1,12846	81,27%	63,05%				

Fonte: Autor (2017)

Tabela 4 – Análise de variância para a circularidade

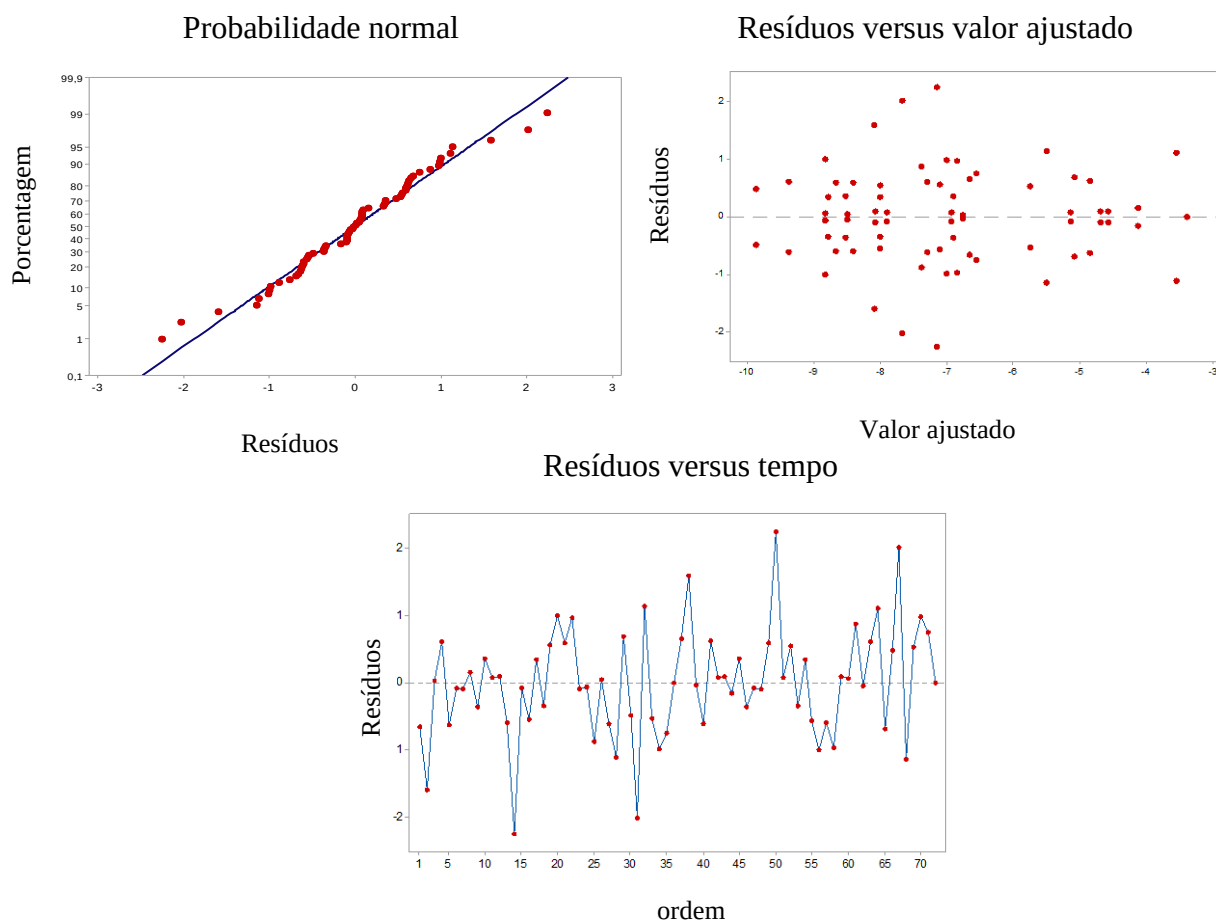


Gráfico 1 – Análise de resíduos para a circularidade: a) Probabilidade normal b) resíduos versus valor ajustado c) resíduos versus tempo

De acordo com a ANOVA da Tabela 4 a ferramenta versus avanço e a ferramenta versus velocidade de corte podem ser analisados. O Gráfico 2 apresenta a interação entre ferramenta e avanço. Com relação à geometria da ferramenta, a broca helicoidal com duas arestas obteve menor variabilidade dos dados, enquanto a broca helicoidal com três arestas apresentou o erro de circularidade máximo, de 0,169 mm. Neste caso, duas explicações podem ser dadas. Em relação à broca helicoidal com duas arestas ter apresentado menores circularidade que a helicoidal com três arestas, isso se deve ao fato de que a primeira possuía um ângulo de ponta menor, de 118°, e a helicoidal com três arestas, um ângulo de ponta de 150°. Resultados semelhantes foram obtidos por Rubio *et al.* (2013), em que brocas com menor ângulo de ponta apresentaram menor erro de circularidade. Quanto ao maior erro de circularidade apresentado pela broca helicoidal com três arestas, esta característica pode estar associada ao fato de que a broca helicoidal com três arestas apresentou os maiores esforços de corte, o que pode ter gerado maiores vibrações e aumentado o desvio do furo. Além disso, um número maior de arestas de corte toca mais vezes a superfície lateral do furo, o que pode fazer com que seu desvio seja maior.

Com relação à influência do avanço, nas brocas Brad & Spur e helicoidal com três arestas, o aumento do avanço levou a um aumento do erro de circularidade. Resultados semelhantes foram obtidos por Zitoune *et al.* (2010). Este comportamento está associado à maior

quantidade de material retirado por volta, o que aumenta a seção transversal do cavaco e a força de avanço. Na broca helicoidal com duas arestas, o aumento do avanço diminuiu o erro de circularidade, mas não se pode atribuir algum efeito especial, pois os erros de circularidade para a broca helicoidal com duas arestas ficaram muito próximos uns dos outros, variando entre 0,010 e 0,042 mm.

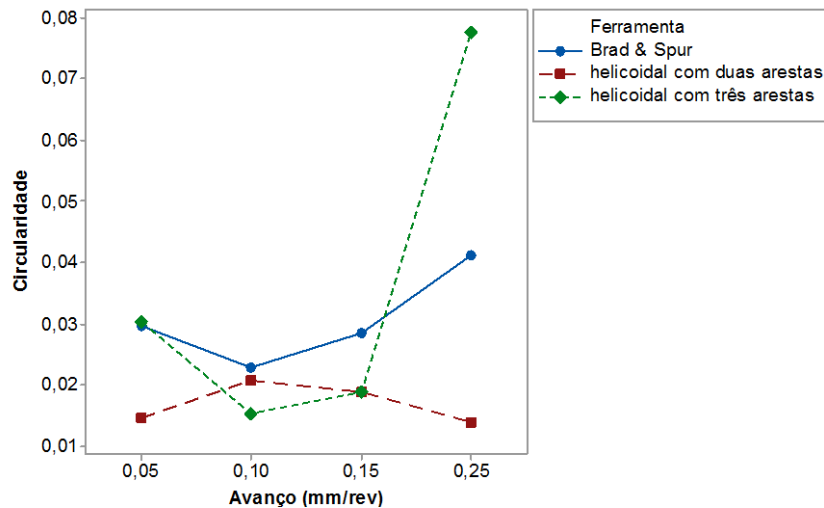


Gráfico 2 – Interação para a circularidade - ferramenta x avanço

Com relação à interação entre ferramenta e velocidade de corte pode-se observar o comportamento do erro de circularidade por meio do Gráfico 3. Não se pode analisar a influência da velocidade de corte separadamente neste caso, uma vez que não foi significativa. Considerando então apenas as velocidades de 24 m/min e 72 m/min, é possível dizer que o erro de circularidade máximo foi observado para a broca helicoidal com três arestas, e o menor para a helicoidal com duas arestas, assim como aconteceu no gráfico de interação ferramenta versus avanço. Observou-se um comportamento instável das brocas Brad & Spur e helicoidal com três arestas na faixa de velocidade de 48 m/min, o que confirma a falta de influência da velocidade de corte sobre a circularidade.

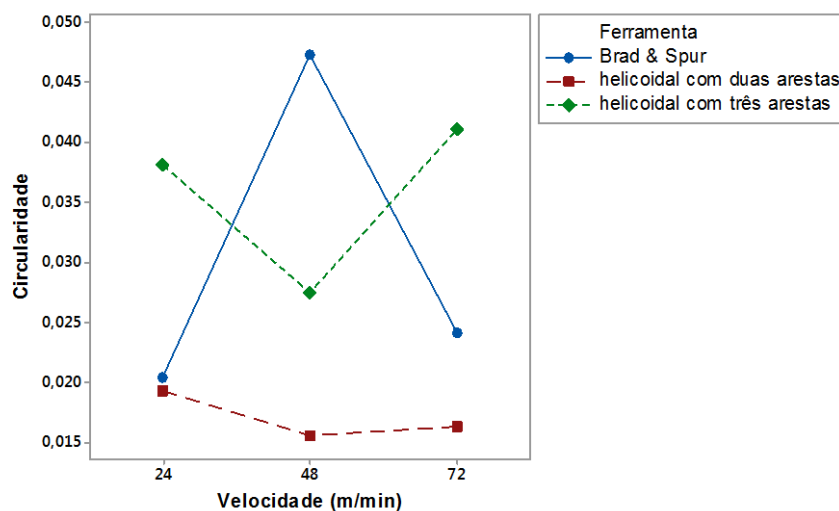


Gráfico 3 - Interação para a circularidade – ferramenta x velocidade de corte

Para compreender melhor a distribuição dos dados para os valores da circularidade, elaborou-se o *boxplot* (Gráfico 4). Cada um dos traços superiores e inferiores representam 25% dos valores da distribuição totalizando 50% dos dados. As extremidades dos traços representam os valores mínimos e máximos para o erro de circularidade. A caixa de amplitude interquartil representa 50% do meio dos dados, indicando a tendência de concentração dos valores para a circularidade.

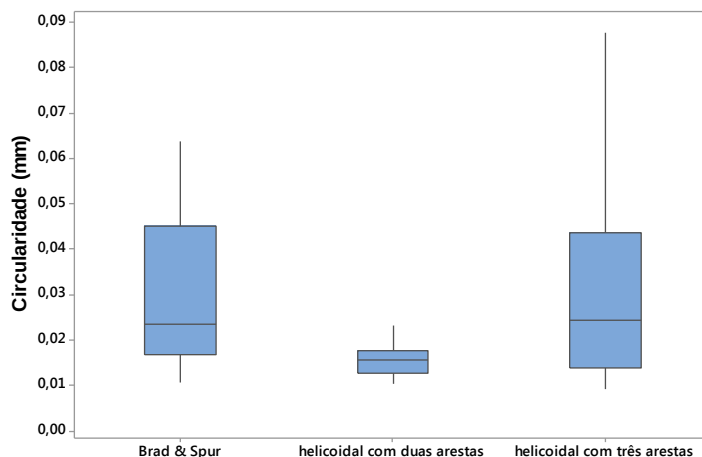


Gráfico 4 - *Boxplot* para a circularidade

O Gráfico 4 indicou que a broca helicoidal com duas arestas apresentou menor variabilidade dos dados, comportamento contrário ao apresentado pela broca helicoidal com três arestas.

6. Conclusões

A partir dos resultados e discussões apresentados neste trabalho, que tratou da furação do material sanduíche polietileno-alumínio laminado utilizando brocas com diferentes geometrias e parâmetros de corte, algumas considerações podem ser feitas.

Com relação à análise da circularidade, a ANOVA permitiu concluir que os fatores de influência foram a ferramenta, o avanço e as interações ferramenta x velocidade de corte e ferramenta x avanço. As interpretações que podem ser feitas são as seguintes: em relação à influência da geometria das ferramentas sobre a circularidade, a broca helicoidal com três arestas apresentou maior variabilidade dos dados, com uma circularidade máxima de 0,169 mm, o que aconteceu devido a um número de arestas maior tocar mais vezes a superfície dos furos, além da broca possuir um ângulo de ponta maior e de apresentar os maiores esforços de corte. A broca helicoidal com duas arestas apresentou baixa variabilidade dos dados, com um valor mínimo de 0,042 mm.

Como trabalhos futuros sobre a furação do material sanduíche em estudo, sugere-se a avaliação da presença ou não de delaminação dos furos.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), CNPQ (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e Fapemig (Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais) por concessão de bolsas de estudos. Agradecem também à Universidade Federal de Minas Gerais, local onde foram realizadas as pesquisas.

Referências

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. *Dimensioning and Tolerancing*. ASME Y14.5M, 1994.

DIN 8589 (2003). *Manufacturing processes chip removal*. Editora Beuth GmbH, 2003.

DURÃO, L.M., GONÇALVES, D., TAVARES, J.M., ALBUQUERQUE, V.H., BAPTISTA, A.M. Danos na furação de placas carbono/epóxico. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*. v. 17, n. 1, p. 27-38, 2013.

FARIA, P.E. *Estudo sobre a Furação de Compósito de Resina Epóxi Reforçado com Fibras de Vidro*. Fevereiro, 2007. 231 p. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica. Escola de Engenharia da UFMG.

MACHADO, A.R., ABRÃO A.M, COELHO, R.T, DA SILVA, M.B. *Teoria da usinagem dos materiais*. 3ª edição. São Paulo: Editora blucher, 2015. 408 p.

MONTGOMERY, D. C. *Introdução ao controle estatístico da qualidade*. 4ª ed. Rio de Janeiro: LTC: 2009. 532 p.

OKASHA, M. M. *Mechanical microdrilling of negative-tapered laser-predrilled holes: a new approach for burr minimization*. *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, v. 61, n. 1-4, p.213-225, 2011.

RUBIO J., SILVA, L., LEITE, W., PANZERA, T., RIBEIRO, S., DAVIM, J.P. *Investigations on the drilling process of unreinforced and reinforced polyamides using Taguchi method*. *Composites Part B: Engineering*, v. 55, p. 338-344, 2013.

STEMMER, C. E. *Ferramentas de corte I*. 5ª Edição, Florianópolis: Editora UFSC, 2001, 249 p.

WEINGAERTNER, W.L., SCHROETER, R.B. *Tecnologia de usinagem do alumínio e suas ligas*. São Paulo: Alcan Alumínio do Brasil, 1990.

WENNBERG, D. *Light-Weighting Methodology in Rail Vehicle Design through Introduction of Load Carrying Sandwich Panels*. 2011. 29 p. Licentiate Thesis. Design Department of Aeronautical and Vehicle Engineering, Stockholm. 2011

WERKEMA, M.C., DRUMOND, F.B., AGUIAR, S. *Análise de variância: comparação de várias situações*. Belo Horizonte, MG: Fundação Christiano Ottoni, 1996, v. 6 da série ferramentas da qualidade.

ZITOUNE, R., KRISHNARAJ, V., COLLOMBET, F. *Study of drilling of composite material and aluminium stack*. *Composite Structures*, v. 92, n.5, p.1246–1255, 2010.