

## Otimização dos parâmetros de corte na furação de compósito híbrido através do Método Taguchi

Bruna Aparecida Rezende (UFMG) [brunarezende12@yahoo.com.br](mailto:brunarezende12@yahoo.com.br)  
Rodrigo Cardoso de Menezes (UFMG) [menezes.eng@hotmail.com](mailto:menezes.eng@hotmail.com)  
Luciano Machado Gomes Vieira (UFMG) [lucianomgv@yahoo.com.br](mailto:lucianomgv@yahoo.com.br)  
Manuel Houmard (UFMG) [mhoumard@ufmg.br](mailto:mhoumard@ufmg.br)  
Juan Carlos Campos Rubio (UFMG) [juan@ufmg.br](mailto:juan@ufmg.br)

### Resumo:

A utilização de materiais compósitos na indústria civil, naval, automotiva e aeroespacial é crescente. Esses materiais apresentam características diferenciadas como peso relativamente baixo, rigidez, resistência elevada, entre outras, devido à combinação das propriedades de cada um desses materiais. O processo de furação é comumente usado em virtude que geralmente os componentes precisam ser fixados. Desvios dimensionais e presença de rebarba são alguns dos problemas que comumente surgem devido à ação da broca na entrada e saída do material. Tais problemas devem ser minimizados, pois podem comprometer o produto final. O presente trabalho consiste no estudo da furação de um material compósito híbrido, em formato sanduíche, constituído por alumínio e núcleo de polietileno - PEALL. São determinados os parâmetros ótimos de corte para a força de avanço, altura da rebarba e diâmetro máximo, através do Método Taguchi.

**Palavras chave:** Furação, força de avanço, rebarba, diâmetro máximo, Método Taguchi.

## Optimization of cutting parameters in hybrid composite drilling by the Taguchi Method

### Abstract:

The use of composite materials in civil, marine, automotive and aerospace industry is growing. These materials have different characteristics as a relatively low weight, stiffness, high strength, among others, due to the combination of the properties of each of these materials. The drilling process is commonly used because generally the components need to be fixed. Dimensional deviations and the presence of burr are some of the problems that commonly arise due to drill action in and out of the material. Such problems should be minimized because they can compromise the final product. The present work is the study of drilling a hybrid composite material in sandwich format, consisting of aluminum and polyethylene core - PEALL. The optimum cutting parameters for the feed force, the burr height and the maximum diameter are determined by Taguchi Method.

**Key-words:** Drilling, feed force, burr, maximum diameter, Taguchi Method.

### 1. Introdução

A constante necessidade de evolução dos produtos implica uma demanda cada vez maior por materiais com características especiais, onde há combinação de propriedades inusuais de metais, cerâmicas e polímeros convencionais. Neste sentido, aplicações aeroespaciais e de

transporte requerem materiais de baixa densidade com boa resistência ao impacto, rigidez, abrasão e corrosão. Esta combinação não é comum, uma vez que materiais mais resistentes são relativamente mais densos, além de que um aumento da resistência e rigidez geralmente se traduz numa redução da resistência ao impacto.

Diante dessa necessidade surgem os materiais compósitos. Segundo a norma ASTM D 3878-07 (2013), material compósito é uma substância que consiste de dois ou mais materiais, insolúveis entre si, que são combinados para formar um material de engenharia útil com propriedades que não se encontram nos constituintes isoladamente.

O crescente uso dos materiais compósitos nas indústrias naval, aeroespacial e automotiva justifica-se pelo fato de esses materiais apresentarem características como peso relativamente baixo, rigidez, resistência elevada, além de outras propriedades consideráveis (EBERHARDT ET AL, 2010). O uso de materiais compósitos ao longo dos anos pode ser visualizado através da figura 1.

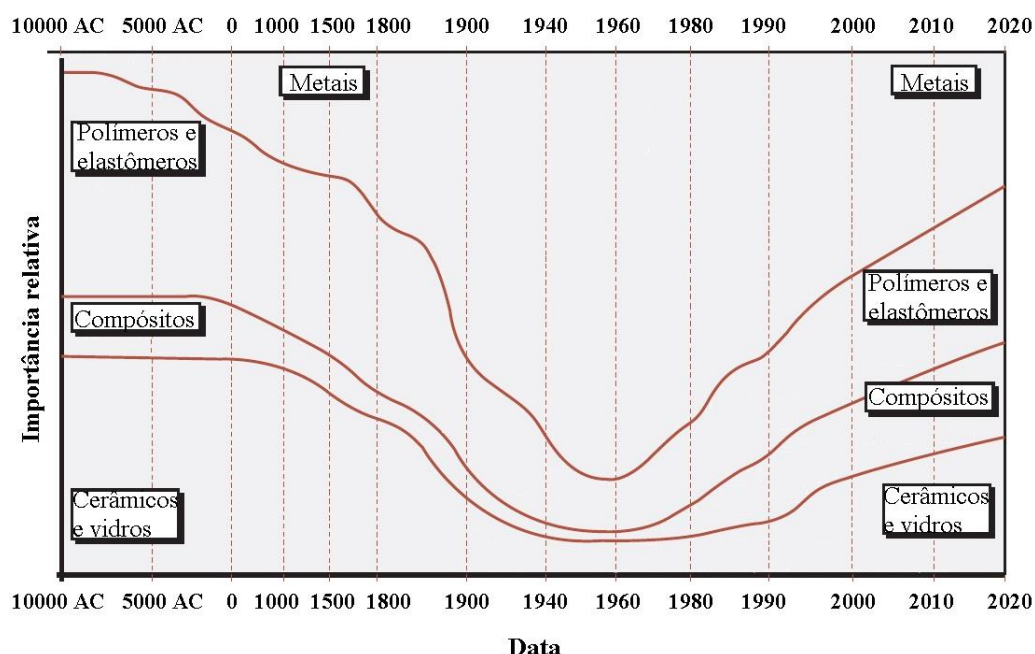


Figura 1 - Importância relativa dos metais, polímeros, compósitos e materiais cerâmicos em função do tempo  
(Adaptado de Ashby, 2005)

Existem atualmente diversos tipos de materiais compósitos. Por exemplo, os materiais compósitos que apresentam uma matriz polimérica, cerâmica ou metálica, reforçada por fibras ou partículas. Entretanto, existe um tipo especial de material compósito, caracterizado por apresentar uma estrutura na forma de sanduíche. Os compósitos sanduíches são constituídos por três partes, duas denominadas faces e uma núcleo (WENNBERG, 2011), conforme figura 2.

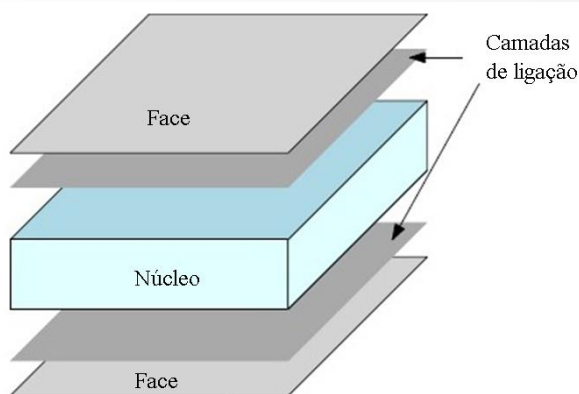


Figura 2 - Painel sanduíche típico, componentes e nomenclatura (Wennberg, 2011)

A usinagem de materiais compósitos é decorrente da necessidade de se fabricar componentes com dimensões geométricas e qualidade adequadas para atender as especificações de um determinado projeto de um produto, o que dificilmente pode ser obtido durante o processo de fabricação do compósito. Dentre os processos convencionais de usinagem normalmente utilizados, podem se citar o torneamento, fresamento e furação.

O processo de furação em materiais compósitos é bastante utilizado, uma vez que a grande maioria dos componentes de materiais compostos precisam ser montados, como são os componentes estruturais de aviões e automóveis (EL-SONBATY ET AL, 2004).

Como em todo processo, durante a furação podem ocorrer alguns problemas, os quais devem ser sempre minimizados. Vários estudos existentes sobre a furação de compósitos relatam que dentre os principais problemas encontrados podem ser citados a delaminação na entrada e saída do furo, desvios geométricos e defeitos referentes à temperatura (LACHAUD ET AL, 2001).

A circularidade, definida por Ng e Li (2001) como a relação entre os diâmetros mínimo e máximo do furo, quando fora da especificação, consiste em um desvio geométrico. As linhas pontilhadas representam o diâmetro mínimo e máximo, e a linha vermelha o diâmetro médio (figura 3).

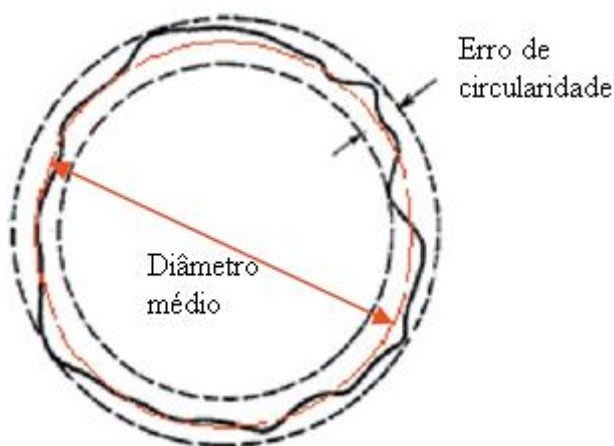


Figura 3 - Círculo medido: diâmetro médio e erro de circularidade (Rubio et al., 2013)

Outro problema observado no processo de furação é a rebarba, a qual é decorrente da deformação plástica do material da peça em função da ação da ferramenta e pode ocorrer na

entrada e saída do furo (PILNÝ ET AL, 2012). Diferentes tipos de rebarba podem ser observados durante o processo de furação.

Kim et al (2001) realizaram experimentos sobre a furação de AISI 304L e AISI 4118 utilizando brocas de aço rápido, e observaram a formação de três tipos de rebarbas: rebarba uniforme, coroa e transição (Fig. 4). A rebarba do tipo uniforme apresenta altura regular e pequenas dimensões, sendo que a rebarba do tipo coroa apresenta dimensões maiores e irregularidades na altura. Já as rebarbas do tipo transição apresentam características das rebarbas uniformes e coroas (KIM ET AL, 2001).

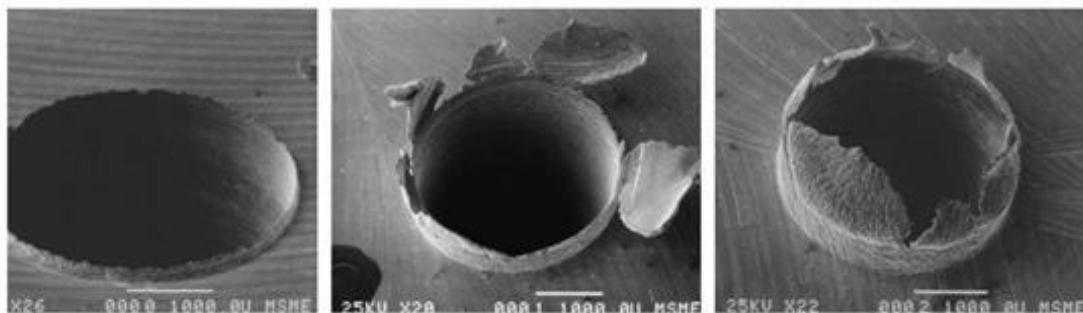


Figura 4 - Tipos de rebarbas do AISI 4118. (a) Uniforme; (b) Transição; (c) Coroa

(Kim et al, 2001).

Pilný et al (2012) avaliaram as rebarbas decorrentes da furação de uma liga de alumínio, utilizando brocas de 1,6 mm e 2 mm. Os resultados demonstraram que houve redução da rebarba com o aumento da velocidade de corte e com redução do avanço também houve a redução de rebarba.

A utilização de revestimento nas ferramentas pode interferir significativamente no processo de furação. Montoya et al (2013) realizaram furação do compósito CFRP/alumínio utilizando quatro tipos de brocas de carboneto de tungstênio, sendo uma sem revestimento e as outras com revestimento de diamante, TiAlCrN e AlTiSiN-G, respectivamente. Os autores concluíram que à medida que o número do furo aumenta, a força também aumenta. Além de a maior força ser observada na furação com broca sem revestimento. Este fenômeno ocorre devido ao fato do desgaste na broca sem revestimento ter sido maior do que nas brocas com revestimento.

O compósito sanduíche escolhido para este trabalho é formado por alumínio e polietileno. Vamja e Tejani (2013) afirmam que a versatilidade do alumínio é o fator que permite a sua aplicação em aeronaves, automóveis, cabos, além da utilização em outros tipos de indústrias. A moldagem desse metal também pode ser de diversas formas, o que facilita a utilização na produção de materiais compósitos. O efeito do revestimento de dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ) em uma das brocas foi também estudado.

O método Taguchi, utilizado neste trabalho, é um método estatístico que tem como objetivo o controle da qualidade de produtos e processos, bem como aumento da produtividade e redução de custos. É uma ferramenta de otimização, através da qual é possível determinar as condições ótimas para determinado processo, através de um menor número de experimentos (PHADKE, 1989; ROSS, 1991). Para determinação do nível ótimo da característica, e assim atender as especificações do produto ou atingir a robustez de um processo, o método Taguchi utiliza a relação sinal-ruído (S/N ou  $\eta$ ), a qual apresenta três condições, de acordo com Phadke (1989):

**Menor o melhor:**

$$\eta = -10\log_{10} \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right]$$

**Maior o melhor:**

$$\eta = -10\log_{10} \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right]$$

**Nominal o melhor:**

$$\eta = 10\log_{10} \frac{\mu^2}{\sigma^2}$$

Onde:

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad \text{e} \quad \sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \mu)^2$$

E  $n$ ,  $i$ ,  $y$  e  $\mu$  denotam o nº de repetições das observações, índice, valor observado e valor nominal respectivamente.

Para minimizar a perda da qualidade significa maximizar a razão sinal-ruído, ou seja, o nível que apresentar uma maior S/N será considerado o nível ótimo.

O presente trabalho consiste na furação de um compósito sanduíche, bem como na medição da força de avanço, medição da altura da rebarba e diâmetro máximo do furo. É utilizado o método Taguchi para determinação das condições ótimas de corte, considerando a razão sinal-ruído (S/N) menor é melhor.

## 2. Materiais e Métodos

### 2.1. Compósito PEALL

O material utilizado para realizar os ensaios de furação é um compósito tipo sanduíche de polietileno-alumínio PEALL (Polietileno alumínio Laminado) conhecido na indústria brasileira como ACM-(Aluminium Composite Materials). Este material consiste em duas (2) fases de alumínio, e é uma liga de Al Mg 1 H2 (EM AW-5005) e um núcleo de polietileno (PE) de baixa densidade, com 0,92 g/cm<sup>3</sup> de densidade totalizando 4 mm de espessura. A Figura 5 apresenta o comportamento do material durante o ensaio de tração e o aspecto da fratura do material. A tabela 1 resume as propriedades mecânicas do compósito sanduíche PEALL. Este tipo de material é comumente utilizado em revestimento de prédios e casas, placas de sinalização e nas estações de ônibus, especificamente do MOVE.

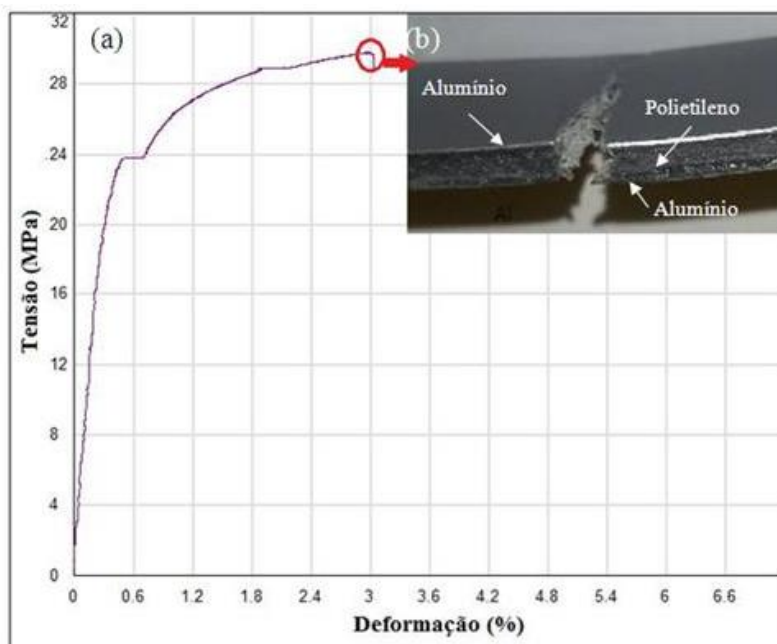


Figura 5 - (a) Curva típica do comportamento tensão/deformação do material, (b) fratura

| Material          | Módulo de Elasticidade na Tração (GPa) | Resistência a Tração (MPa) | Alongamento (%) |
|-------------------|----------------------------------------|----------------------------|-----------------|
| PEALL - ACM (4mm) | 6,51±1,28                              | 30,31±1,78                 | 4±1,4           |
| Alumínio          | 70                                     | 110                        | 2               |
| Polietileno       | 0,102±0,240                            | 6,9-16                     | 550-600         |

Fonte: Coutinho et al (2003), Kulekci (2014), Smith e Hashemi (2012)

Tabela 1 - Propriedades mecânicas do compósito PEALL utilizado, alumínio e polietileno

Os metais geralmente utilizados para a fabricação do compósito sanduíche são aços ou ligas de alumínio e os polímeros são polietileno ou polipropileno. O material compósito utilizado no presente trabalho é do tipo sanduíche, formado por alumínio e polietileno. A placa do compósito utilizado para os testes apresenta dimensões de 100 mm x 120 mm e espessura de 4 mm. Foram utilizadas duas brocas de aço rápido, sendo uma com e a outra sem revestimento de dióxido de titânio. As ferramentas apresentam diâmetro de 5 mm, ângulo de ponta de 130° e ângulo de hélice de 25°.

## 2.2. Revestimento de dióxido de titânio (TiO<sub>2</sub>)

Um revestimento de TiO<sub>2</sub> foi utilizado em uma das brocas de aço rápido (HSS), que também foi tratada termicamente a 400°C. O revestimento foi processado por tecnologia Sol-Gel e depositado por dip-coating com uma velocidade de ~20 cm/min. No processo de deposição sol-gel há uma solução na qual os reagentes são misturados, semelhante a uma suspensão coloidal de partículas inorgânicas (DE GROOT ET AL, 1998). Neste processo os materiais são misturados em nível de moléculas, gerando, após evaporação do solvente, filmes finos com grande homogeneidade, a baixas temperaturas e a um custo baixo (AVELLANEDA, 1999). Neste trabalho, os reagentes utilizados foram tetraisopropilo orthotitanato (TIPT), água desionizada (H<sub>2</sub>O), HCl (ácido clorídrico, pureza de 36%) e etanol absoluto como solvente. Essa solução é caracterizada pela concentração de TIPT (C = 0,4 Mol/L), razão molar TIPT/água (rw = 0,82) e pH = 1,27 em acordo com a literatura (BURGOS E LANGLET,

1999). De acordo com este estudo sobre revestimento de  $\text{TiO}_2$  realizado com essa mesma receita, a espessura do filme que se pode obter é de cerca de 100 nm. O tempo de envelhecimento da solução sol-gel antes da deposição do filme foi de pelo menos duas semanas, o que pode alterar a espessura do filme. Os revestimentos de filmes de dióxido de titânio são altamente utilizados devido ao alto índice de refração e baixa absorção do  $\text{TiO}_2$  assim como suas boas propriedades mecânicas, tornando-se um revestimento de óxido transparente e mecanicamente resistente (BURGOS E LANGLET, 1999).

### 2.3. Montagem Experimental e equipamentos

A Figura 6 mostra a montagem experimental utilizada, onde pode ser observado o eixo árvore e a broca montada, assim como o suporte de fixação e o dinamômetro extensométrico utilizado para medição da força de avanço. O Centro de usinagem utilizado foi o ROMI modelo Discovery 560, com potência de 9 kW e rotação máxima de 7500 rpm no eixo árvore. Para a medição da rebarba foi utilizado um microscópio GSZ 2T e para a medição do diâmetro máximo dos furos foi utilizada a máquina de medição por coordenadas TESA, modelo MICRO HITE 3D, com o software REFLEX SCAN.

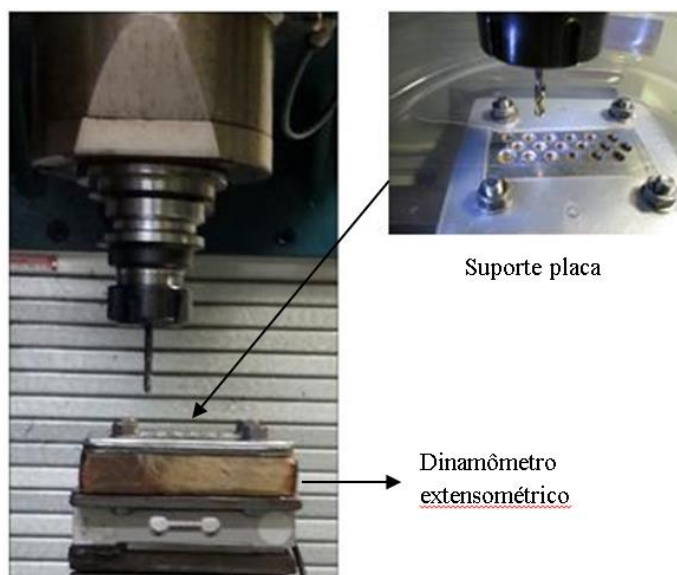


Figura 6 - Montagem experimental.

### 2.4. Planejamento experimental

No presente estudo foram utilizados três parâmetros na furação do compósito sanduíche, sendo avanço, velocidade de corte e ferramenta. Os níveis de cada parâmetro estão na tabela a seguir (Tabela 2).

| Símbolo | Parâmetros                  | Níveis           |                  |      |      |
|---------|-----------------------------|------------------|------------------|------|------|
|         |                             | 1                | 2                | 3    | 4    |
| A       | Velocidade de corte (m/min) | 24               | 48               | 72   | -    |
| B       | Avanço (mm/rev)             | 0,05             | 0,10             | 0,15 | 0,25 |
| C       | Ferramenta                  | Sem revestimento | Com revestimento | -    | -    |

Tabela 2 - Condições experimentais.

Para a análise do método Taguchi foi determinado o arranjo ortogonal L16 como adequado ao experimento. Cada teste foi realizado duas (2) vezes e foram obtidos os valores de força de avanço, altura da rebarba e diâmetro máximo.

### 3. Resultados e Discussões

Na tabela 3 é mostrado o arranjo L16.

| Nº do experimento | Velocidade de corte (m/min) | Avanço (mm/rev) | Ferramenta |
|-------------------|-----------------------------|-----------------|------------|
| 1                 | 1                           | 1               | 1          |
| 2                 | 1                           | 2               | 1          |
| 3                 | 1                           | 3               | 2          |
| 4                 | 1                           | 4               | 2          |
| 5                 | 2                           | 1               | 1          |
| 6                 | 2                           | 2               | 1          |
| 7                 | 2                           | 3               | 2          |
| 8                 | 2                           | 4               | 2          |
| 9                 | 3                           | 1               | 2          |
| 10                | 3                           | 2               | 2          |
| 11                | 3                           | 3               | 1          |
| 12                | 3                           | 4               | 1          |
| 13                | 2                           | 1               | 2          |
| 14                | 2                           | 2               | 2          |
| 15                | 2                           | 3               | 1          |
| 16                | 2                           | 4               | 1          |

Tabela 3 - Arranjo L16 das condições experimentais

Através do software Minitab 17, foram gerados os gráficos da razão sinal-ruído. As figuras 7, 8 e 9 correspondem às razões sinal-ruído para a força de avanço, altura da rebarba e diâmetro máximo, respectivamente.

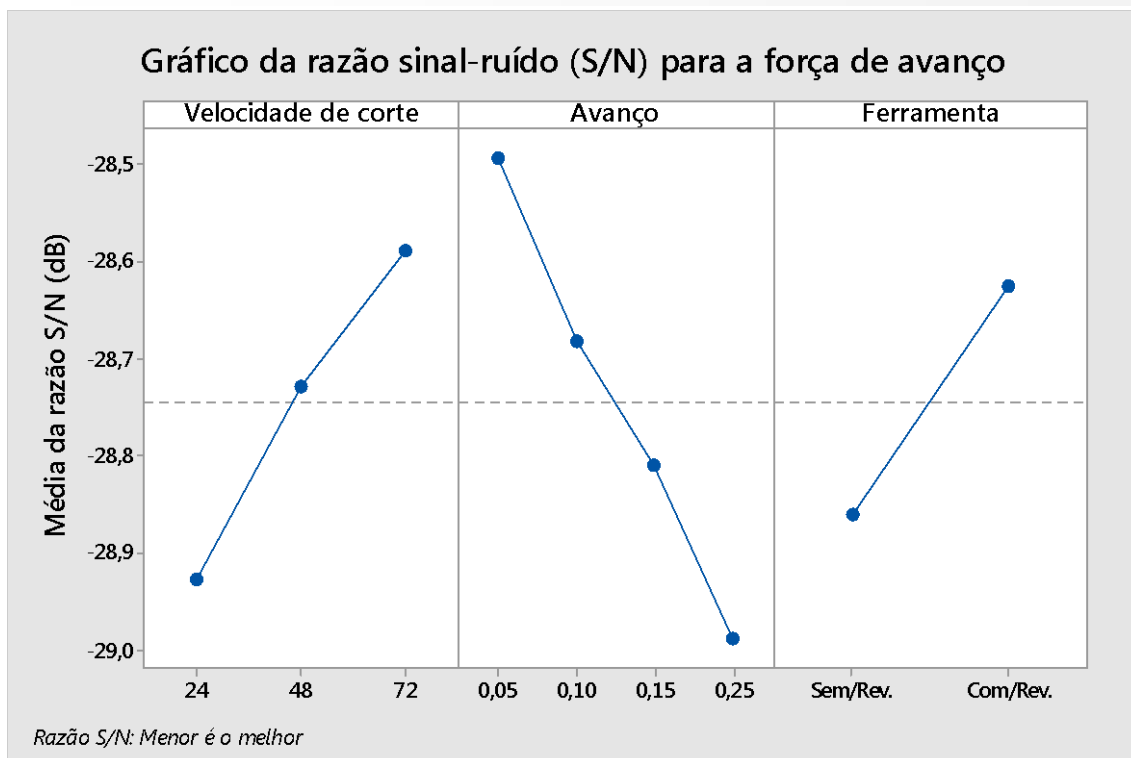


Figura 7 - Gráfico da razão sinal-ruído para a força de avanço.

Os parâmetros ótimos para a furação do PEALL tendo como objetivo a redução da força de avanço foram A3, B1 e C2. Quando se utiliza a velocidade de corte de 72 m/min, a peça de trabalho oferece menor resistência ao corte, sendo necessária uma menor força de avanço durante a furação. A força de avanço é diretamente proporcional ao avanço, sendo que o uso de um menor avanço leva a uma diminuição da força.

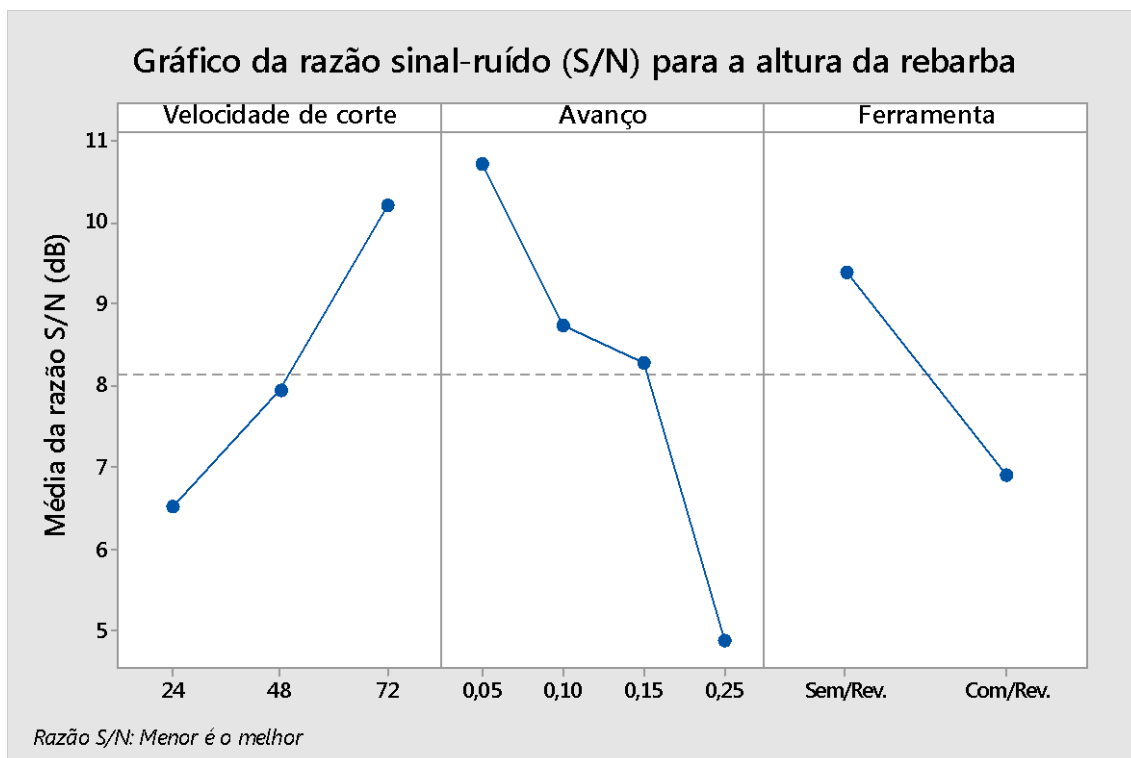


Figura 8 - Gráfico da razão sinal-ruído para a altura da rebarba

Os parâmetros ótimos para a furação do PEALL tendo como objetivo a redução da altura da rebarba foram A3, B1 e C1. Para a maior velocidade de corte há uma menor resistência do material da peça, devido ao aquecimento, e o cisalhamento ocorre mais facilmente, gerando uma menor rebarba. Já para o avanço de 0,05 mm/rev, a quantidade de material retirado por volta é menor, levando a uma menor altura da rebarba.

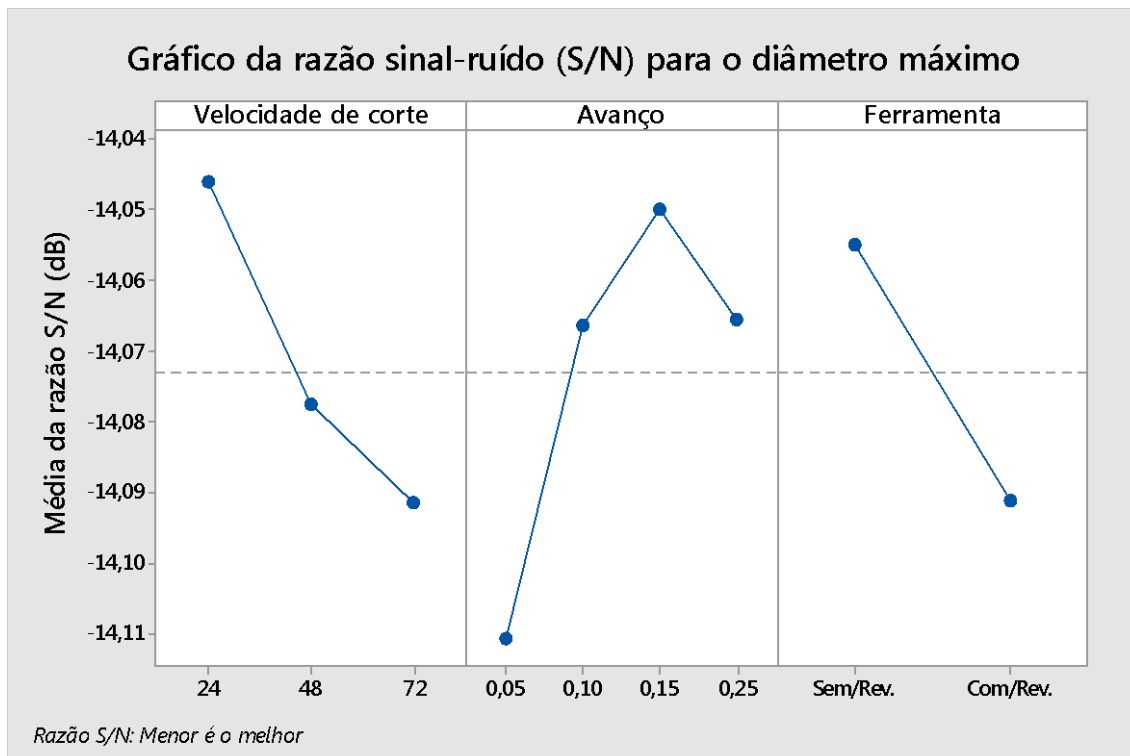


Figura 9 - Gráfico da razão sinal-ruído para o diâmetro máximo

Os parâmetros ótimos para a furação do PEALL tendo como objetivo a redução do diâmetro máximo foram A1, B3 e C1. Para a velocidade de corte de 24 m/min ocorre um menor aquecimento no furo, ocasionando um menor erro em relação ao diâmetro médio de 5mm. O avanço de 0,015 é o avanço ótimo, pois valores abaixo ocasionam também um maior aquecimento no furo.

#### 4. Conclusões

O método Taguchi foi utilizado para a determinação das condições ótimas de corte, tendo em vista diminuição da força de avanço, rebarba e diâmetro máximo. A ferramenta com revestimento, velocidade de corte de 72 m/min e avanço de 0,05 mm/rev é a combinação ótima de corte para a obtenção de menor força de avanço. Para a rebarba foram a ferramenta sem revestimento, velocidade de corte de 72 m/min e avanço de 0,05 mm/rev. Já para o diâmetro máximo foram ferramenta sem revestimento, velocidade de corte de 24 m/min e avanço de 0,15 mm/rev. A melhor combinação de parâmetros a ser utilizada depende do objetivo que se deseja alcançar.

#### 5. Referências

- ASHBY, M. F. *Materials Selection in Mechanical Design*. 3 ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2005.
- ASTM D 3878-07 (2013): "Standard Terminology for Composite Materials", Philadelphia, 2013.
- AVELLANEDA, C. A. O. *Desenvolvimento de janelas eletrocromicas preparadas pelo processo sol-gel*. São Carlos, 1999. 102p. Tese (Doutorado) – Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo.

**BURGOS, M.; LANGLET, M.** *Condensation and Densification Mechanism of Sol-Gel TiO<sub>2</sub> Layers at Low Temperature.* Journal of Sol-Gel Science and Technology. 16, 267–276 (1999).

**COUTINHO, F. M. B. MELLO I. L. MARIA L.C.S.** *Polietileno: Principais Tipos, Propriedades e Aplicações.* Instituto de Química, UERJ. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 13, nº 1, p. 1-13, 2003.

**DE GROOT, K.; WOLKE, J.CK.; JANSEN, J.A.** “ *Calcium Phosphate Coating: Alternatives To Plasma Spray.* ” In: Bioceramics, v.11, Proceeding of the 11th Internacional Symposium on Ceramics in Medicine, USA, pp 41- 43 (1998).

**EBERHARDT, G. G.; BOEHS, L.; SALMORIA, G. V.** *Avaliação da qualidade dos furos na usinagem de compósitos à base de resina epóxi com e sem carga de pó-de-ferro.* VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2010.

**EL-SONBATY, I.; KHASHABA, U. A.; MACHALY, T.** *Factors affecting the machinability of GFR/epoxy composites.* Composite Structures, 63; 329–338, 2004.

**KIM, J. ; MIN, S. ; DORNFELD, D. A.** *Optimization and control of drilling burr formation of AISI 304L and AISI 4118 based on drilling burr control charts.* International journal of machine tools & manufacture: design, research and application, 41, 923-936, 2001.

**KULEKCI, M.K.** *Effects of process parameters on tensile shear strength of friction stir spot welded aluminium alloy (EM AW 5005).* Archives of Metallurgy and materials, 59, Issue 1, 2014.

**LACHAUD, F.; PIQUET, R.; COLLOMBET, F.; SURCIN, L.** *Drilling of Composite Structures.* Composite Structures, 2001: 52; 511-516.

**MONTOYA, M.; CALAMAZ, M.; GEHIN, D.; GIROT, F.** *Evaluation of the performance of coated and uncoated carbide tools in drilling thick CFRP/aluminium alloy stacks.* International journal of advanced manufacturing technology, 68; 2111-2120, 2013.

**NG, G.K.L.; LI, L.** *The effect of laser peak power and pulse width on the hole geometry repeatability in laser percussion drilling.* Optics & Laser Technology, 33; 393–402, 2001.

**PHADKE, M. S.** *Quality engineering using robust design.* USA: Prentice-Hall, 1989.

**PILNÝ, L.; CHIFFRE, L. DE.; PÍSKA, M.; VILLUMSEN, M. F.** *Hole quality and burr reduction in drilling aluminium sheets.* CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 5; 102–107, 2012.

**ROSS, PHILLIP J.** *Aplicações das técnicas Taguchi na engenharia da qualidade.* São Paulo: Makron: McGraw-Hill, 1991.

**RUBIO, J. C. ET AL.** *Investigations on the drilling process of unreinforced and reinforced polyamides using Taguchi method.* Composites: Part B, 55, 338–344, 2013.

**SMITH, W. F.; HASHEMI, J.** *Fundamentos de Engenharia e Ciência dos Materiais.* 5. Ed. Editora AMGH, Porto Alegre, 2012. 734 p.

**VAMJA, D. G., TEJANI, G. G.** *Experimental Test on Sandwich Panel Composite Material.* International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, Vol. 2, Issue 7, July 2013.

**WENNBERG, DAVID.** “*Light-Weighting Methodology in Rail Vehicle Design through Introduction of Load Carrying Sandwich Panels*”, Design Department of Aeronautical and Vehicle Engineering, 2011.