



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

FURAÇÃO DE MATERIAL SANDUÍCHE EMPREGANDO
BROCAS COM GEOMETRIAS DIFERENTES

MICHELE LISBOA SILVEIRA

Belo Horizonte, 16 de fevereiro de 2017

Michele Lisboa Silveira

FURAÇÃO DE MATERIAL SANDUÍCHE EMPREGANDO BROCAS COM GEOMETRIAS DIFERENTES

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial à obtenção de título de Mestre em Engenharia de Produção.

Área de concentração: Processos de Fabricação e Materiais

Orientador: Professor Dr. Paulo Eustáquio de Faria

Coorientador: Professor Dr. Juan Carlos Campos Rubio

Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2017

S587f

Silveira, Michele Lisboa.

Furação de material sanduíche empregando brocas com geometrias diferentes [manuscrito] / Michele Lisboa Silveira. – 2017.
97 f., enc.: il.

Orientador: Paulo Eustáquio de Faria.

Coorientador: Juan Carlos Campos Rubio.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais,
Escola de Engenharia.

Apêndices: f. 94-97.

Bibliografia: f. 87-93.

1. Engenharia de produção – Teses. 2. Brocas (Ferramenta) - Teses.
3. Perfuração e broqueamento - Teses. I. Faria, Paulo Eustáquio de.
II. Campos Rubio, Juan Carlos. III. Universidade Federal de Minas Gerais.
Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 658.5(043)



FOLHA DE APROVAÇÃO

FURAÇÃO DE MATERIAL SANDUÍCHE EMPREGANDO BROCAS COM GEOMETRIAS DIFERENTES

MICHELE LISBÔA SILVEIRA

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, como requisito para obtenção do grau de Mestre em ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, área de concentração PESQUISA OPERACIONAL E ENGENHARIA DE MANUFATURA, linha de pesquisa Processos de Fabricação e Materiais.

Aprovada em 16 de fevereiro de 2017, pela banca constituída pelos membros:


Prof(a). Paulo Eustáquio de Faria - Orientador
UFMG


Prof(a). Juan Carlos Campos Rubio
Universidade Federal de Minas Gerais


Prof(a). Marcelo Araújo Câmara
Universidade Federal de Minas Gerais


Prof(a). Alexandre Mendes Abrao
UFMG

Belo Horizonte, 16 de fevereiro de 2017.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus a oportunidade de realizar o mestrado, todas as orações atendidas e a interseção de Nossa Senhora. Obrigada, Senhor, por ter me dado saúde e força para alcançar meus objetivos.

Aos meus pais, Daniel e Maria das Graças, pelo amor e apoio incondicional, propiciando minha formação. Vocês sempre acreditaram em mim e nunca mediram esforços para que eu realizasse meus sonhos.

Aos meus irmãos, Victor e Rafaela, pela parceria e amizade. Agradeço as conversas, desabafos e conselhos. Vocês são o melhor presente que a vida me deu.

Ao Matheus, pelo carinho e confiança. Por nunca medir esforços para estar ao meu lado, por todo amor e companheirismo.

À Universidade Federal de Minas Gerais, por permitir conhecimentos gerados por toda a vida.

Ao professor Paulo Eustáquio Faria, pela paciência, dedicação e incentivo, sem os quais não seria possível a realização deste trabalho.

Ao professor Juan Carlos Campos Rubio, por acreditar no trabalho realizado, pelas cobranças que permitiram o anseio por aprender cada vez mais.

Aos professores Marcelo Araújo Câmara e Alexandre Mendes Abrão, pela participação na banca e pelos ensinamentos, tanto em sala de aula quanto nas inúmeras orientações, e por estarem sempre dispostos a me atender.

Aos colegas do Laboratório de Usinagem: Bruna, Augusto, Deibe, Rodrigo, Bárbara, Natália, Anderson e a todos com quem pude conviver durante o mestrado; por tantas vezes que compartilhamos aprendizados da vida acadêmica e pessoal.

À CAPES, pela oportunidade que me foi dada para prosseguir meus estudos por meio da concessão de bolsa.

Agradeço a todos que passaram em minha vida, cada palavra, cada sorriso. De todas as situações vividas, que me ajudaram a reconhecer a mim mesma, traçando meus caminhos e conquistando resultados.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE GRÁFICOS.....	10
LISTA DE TABELAS	11
LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS.....	13
RESUMO.....	16
ABSTRACT	17
1. INTRODUÇÃO.....	18
1.1. Objetivo geral.....	19
1.1.1 Objetivos específicos	19
1.2 Estrutura do trabalho.....	20
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 Materiais na indústria metal-mecânica.....	21
2.1.1 Aplicações de materiais estruturais	22
2.2 Painéis sanduíche.....	23
2.3 Usinagem de materiais sanduíche	25
2.3.1 Operação de furação	25
2.3.2 Elementos da broca helicoidal	25
2.4 Brocas com geometrias especiais.....	26
2.5 Materiais para ferramentas de corte	28
2.5.1 Ferramentas de corte de metal duro.....	31
2.6 Formação de cavacos.....	32
2.7 Aspectos tribológicos (interação entre metal duro e PEALL)	35
2.8 Forças na furação	38
2.9 Qualidade do furo em materiais compósitos e estruturais	40
2.9.1 Delaminação.....	41
2.9.2 Rebarbas	42
2.9.3 Circularidade.....	44
2.9.4 Defeitos causados pela temperatura	45
3. METODOLOGIA	47
3.1 Polietileno-Alumínio Laminado (PEALL)	47
3.2 Ferramentas de corte.....	49

3.3 Centro de usinagem e sistema de aquisição de dados.....	49
3.3.1 Calibração do sistema de aquisição de dados.....	51
3.4 Sistema de medição de rebarbas.....	52
3.5 Sistema de medição de circularidade	53
3.6 Planejamentos dos experimentos	54
3.7 Análise de variância	54
3.7.1 Verificação da Adequação da ANOVA – Análise de Resíduos.....	56
3.8 Análise de regressão linear múltipla	57
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
4.1 Força de avanço	59
4.1.1 Comportamento gráfico da força de avanço	59
4.1.2 Análise de variância para a força de avanço	63
4.1.3 Análise de regressão linear múltipla para a força de avanço.....	66
4.2 Altura da rebarba na saída do furo.....	71
4.2.1 Análise qualitativa das rebarbas	71
4.2.2 Análise de variância para a altura da rebarba	73
4.3 Circularidade.....	76
4.4 Análise dos cavacos	80
5. CONCLUSÕES	84
6. PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS.....	86
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
APÊNDICE A.....	94
Dados utilizados para calibração e equação de regressão da força de avanço x diferença de potencial	94
APÊNDICE B.....	95
Resultados para as medições da força de avanço, altura da rebarba e circularidade	95

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - Materiais na indústria.....	21
FIGURA 2.2 - Constituição de painel sanduíche (ASKELAND et al., 2011).....	24
FIGURA 2.3 - Elementos da cunha cortante e ângulos de uma broca helicoidal (Modificado de Diniz et al., 2012).	26
FIGURA 2.4 - Brocas com geometrias diferentes: (a) helicoidal, b) escalonada, (c) Brad & Spur.....	26
FIGURA 2.5 - Broca punhal utilizada por Albuquerque et al. (2009).	27
FIGURA 2.6 - Cavacos obtidos na furação de PA66 para a velocidade de corte 63 m/min sob diferentes avanços: a) 2,25 mm/rev b) 4 mm/min (GAITONDE et al., 2011).	33
FIGURA 2.7 - Formas de cavacos produzidos na usinagem dos metais (ISO 3685, 1993).	34
FIGURA 2.8 - Mecanismos de desgaste em ferramentas de corte em função da temperatura (VIEREGGE apud KÖNIG e KLOCKE, 1997).	36
FIGURA 2.9 - Furação em materiais compósitos e estruturais (TSAO e HOCHENG, 2005).	40
FIGURA 2.10 - Mecanismos de delaminação: a) entrada b) saída (DURÃO et al., 2008).	41
FIGURA 2.11 - Tipos de rebarba: a) rebarba uniforme baixa, b) rebarba uniforme alta, c) rebarba “cap”, d) rebarba de transição, e) rebarba coroa (KIM et al., 2001).	42
FIGURA 2.12 - Mecanismo de formação de rebarba: a) rebarba uniforme b) rebarba uniforme com formação de "cap" c) rebarba coroa.	43
FIGURA 2.13 - Erro de circularidade.....	44
FIGURA 3.1 - PEALL.	47
FIGURA 3.2 - Brocas utilizadas para furação: a) Brad & Spur b) helicoidal com duas arestas c) helicoidal com três arestas.	49
FIGURA 3.3 - Configuração do experimento.....	50
FIGURA 3.4 - Dinamômetro extensométrico.	50
FIGURA 3.5 - Esquema de funcionamento do sistema de aquisição de dados.	51
FIGURA 3.6 - Microscópio Askania, modelo GSZ 2T.....	52

FIGURA 3.7 - Representação esquemática da medição da altura da rebarba.....	52
FIGURA 3.8 - Máquina de medição por coordenadas TESA, MICRO HITE 3D.....	53

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 2.1 - Evolução de materiais para ferramentas de corte e velocidades de trabalho aplicadas (CIMM, 2016).	29
GRÁFICO 2.2 - Efeito do avanço sobre a máxima força de avanço (DURÃO et al., 2010).	39
GRÁFICO 2.3 - Influência dos parâmetros de corte sobre a força de avanço (LATHA et al., 2011).	40
GRÁFICO 2.4 - Interação sinal-ruído obtida para o erro de circularidade (RUBIO et al., 2013).	45
GRÁFICO 4.1 - Perfil da força de avanço para a broca Brad & Spur.....	60
GRÁFICO 4.2 -Perfil da força de avanço para a broca helicoidal com duas arestas.	61
GRÁFICO 4.3 - Perfil da força de avanço para a broca helicoidal com três arestas.	62
GRÁFICO 4.4 - Análise de resíduos para a força de avanço: a) Probabilidade normal b) resíduos versus valor ajustado c) resíduos versus tempo.....	64
GRÁFICO 4.5 - Interação para a força de avanço.	65
GRÁFICO 4.6 - Análise de resíduos para a equação da broca Brad & Spur.	68
GRÁFICO 4.7 - Análise de resíduos para a equação da broca helicoidal com duas arestas.	69
GRÁFICO 4.8 - Análise de resíduos para a equação da helicoidal com três arestas.	69
GRÁFICO 4.9 - Análise de resíduos para altura da rebarba: a) Probabilidade normal b) resíduos versus valor ajustado c) resíduos versus tempo.....	75
GRÁFICO 4.10 - Interação para a altura da rebarba.....	75
GRÁFICO 4.11 – Análise de resíduos para a circularidade: a) Probabilidade normal b) resíduos versus valor ajustado c) resíduos versus tempo.....	77
GRÁFICO 4.12 – Interação para a circularidade - ferramenta x avanço	77
GRÁFICO 4.13 - Interação para a circularidade – ferramenta x velocidade de corte.....	79
GRÁFICO 4.14 - Boxplot para a circularidade.....	79
GRÁFICO A.1 - Gráfico força de avanço x diferença de potencial.....	94

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1- Propriedades mecânicas do Kevlar e do aço (KENDALL,1999).....	23
TABELA 2.2 - Dados quantitativos das principais propriedades das ferramentas de corte (ABRÃO,1995).	30
TABELA 2.3 - Esforços de corte na furação (DINIZ et al., 2012).	38
TABELA 3.1 - Composição química da liga de alumínio (DIN EN 573-3, 2009).....	48
TABELA 3.2 - Propriedades físicas do polietileno (COUTINHO et al., 2003).....	48
TABELA 3.3 - Propriedades mecânicas do PEALL REZENDE (2016).....	48
TABELA 3.4 - Descrição técnica das brocas utilizadas nos ensaios de furação.	49
TABELA 3.5 - Parâmetros do experimento.	54
TABELA 3.6 - Análise de variância para um experimento de um fator Montgomery (2009).....	55
TABELA 3.7 - Gráficos para análise de resíduos (WERKEMA et al., 1996)	57
TABELA 4.1 - Análise de variância para a força de avanço.....	63
TABELA 4.2 - Informações da equação de regressão da broca Brad & Spur.....	67
TABELA 4.3 – Informações da equação de regressão da broca helicoidal com duas arestas.	67
TABELA 4.4 - Informações da equação de regressão da broca helicoidal com três arestas.	68
TABELA 4.5 - Análise de variância para a broca Brad & Spur.....	70
TABELA 4.6 - Análise de variância para a broca helicoidal com 2 arestas.....	70
TABELA 4.7 - Análise de variância para a broca helicoidal com 3 arestas.....	71
TABELA 4.8 - Rebarbas na saída do furo para a broca Brad & Spur.....	72
TABELA 4.9 - Rebarbas na saída do furo para a broca helicoidal com duas arestas.	72
TABELA 4.10 - Rebarbas na saída do furo para a broca helicoidal com três arestas.	73
TABELA 4.11 - Análise de variância para altura da rebarba.	74
TABELA 4.12 - Análise de variância para a circularidade.	76
TABELA 4.13 - Cavacos gerados na furação com broca Brad & Spur (escala em mm).....	81

TABELA 4.14 - Cavacos gerados na furação com broca helicoidal com duas arestas (escala em mm).....	82
TABELA 4.15 - Cavacos gerados na furação com broca helicoidal com três arestas (escala em mm).....	83
TABELA A.1 - Dados utilizados para calibração.	94
TABELA B.1 - Resultados para as medições da força de avanço (F_f).	95
TABELA B.2 - Resultados para as medições da altura da rebarba (mm)	96
TABELA B.3 - Resultados para as medições de circularidade (mm).	97

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

Lista de símbolos

a	-	número de tratamentos
A_{γ}	-	superfície de saída
A_{α}	-	superfície de folga
A'_{α}	-	superfície de folga secundária
d	-	diâmetro
f	-	avanço
e_{ij}	-	resíduo de ordem ij
E	-	constante associada à equação
F	-	valor F
F_f	-	força de avanço
GPa	-	giga pascal
m	-	número de replicações dentro de cada tratamento
kN/m^3	-	peso específico
MPa	-	mega pascal
N	-	número de observações
p	-	valor p
S	-	aresta principal de corte
S'	-	aresta secundária de corte
S/N	-	relação sinal-ruído
T	-	valor T
V_c	-	velocidade de corte
x_{ij}	-	observação de ordem ij
\bar{x}_i	-	média do tratamento i
x_i	-	variáveis associadas
y	-	variável de resposta

Lista de símbolos gregos

α_o	-	ângulo de folga
β_o	-	ângulo de cunha
β_i	-	coeficientes de regressão
γ_o	-	ângulo de saída
ε_r	-	ângulo de ponta
ε_f	-	deformação crítica
μ	-	coeficiente de atrito
χ_r	-	ângulo de posição
χ'_r	-	ângulo de posição secundária

Lista de abreviaturas e siglas

ACM	-	material composto de alumínio (<i>aluminium composite material</i>)
Al	-	alumínio
Al ₂ O ₃	-	óxido de alumínio
ANOVA	-	análise de variância (<i>analysis of variance</i>)
APC	-	aresta postiça de corte
BORAL	-	material composto de alumínio e borracha
CBN	-	nitreto cúbico de boro (<i>cubic boron nitride</i>)
DIN	-	Instituto Alemão de Normalização (<i>Deutsche Institut für Normung</i>)
HSS	-	aço rápido (<i>high speed steel</i>)
ISO	-	Organização Internacional de Padronização (<i>International Standard Organization</i>)
MDF	-	painel de fibra com densidade média (<i>medium density fiberboard</i>)
MQ tratamentos	-	média quadrática dos tratamentos
MQ _E	-	média quadrática dos erros
NBR	-	norma brasileira
PA6	-	poliamida sem reforço com 6 cadeias de polímeros

PA66	-	poliamida sem reforço com 66 cadeias de polímeros
PA66 GF30	-	poliamida reforçada com 30% de fibra de vidro
PCD	-	diamante sintético policristalino (<i>polycrystalline diamond</i>)
PCBN	-	nitreto cúbico de boro policristalino (<i>polycrystalline cubic boron nitride</i>)
PE	-	polietileno
PEALL	-	polietileno – alumínio laminado
PRFC/Al	-	polímero reforçado com fibras de carbono empilhado com alumínio
PRFV	-	polímero reforçado com fibras de vidro
PVDF	-	fluoreto de polivinilidieno
rpm	-	rotações por minuto
R-sq	-	coeficiente de correlação
R-sq(adj)	-	coeficiente de correlação ajustado
Si ₃ N ₄	-	nitreto de silício
SiC	-	carboneto de silício
SQ _{tratamentos}	-	soma dos quadrados dos tratamentos
SQ _E	-	soma dos quadrados dos erros
SQ _T	-	soma de quadrados total
TiC	-	carboneto de titânio
UFMG	-	Universidade Federal de Minas Gerais
WC	-	carboneto de tungstênio
ZrO ₂	-	dióxido de zircônio

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. Para a força de avanço, identificou-se o comportamento gráfico gerado por cada broca, além da apresentação de análise de variância. Buscou-se estabelecer uma equação de regressão para cada broca, a fim de apresentar um modelo que representasse o comportamento da força de avanço quando submetida a diferentes parâmetros de corte. Fizeram-se considerações a respeito das rebarbas por meio de imagens e análise de variância, enquanto a circularidade foi discutida quantitativamente. A partir dos resultados, verificou-se que a broca *Brad & Spur* apresentou rebarbas na saída do furo variando entre 0,06 mm e 0,62 mm. Quanto aos esforços de corte a *Brad & Spur* obteve uma força de avanço mínima de 42 N. Por outro lado, a broca helicoidal com duas arestas mostra um comportamento que pode ser facilmente modelado por meio de equações matemáticas. Já quanto à circularidade, a broca helicoidal com duas arestas apresentou circularidade mínima de 0,01 mm. 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, parâmetros de corte.

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. For the thrust force the graphical behavior generated by each drill was identified, besides the presentation of the variance analysis. It was tried to establish a regression equation for each drill, in order to present a model that represented the behavior of the thrust force when submitted to different cutting parameters. Considerations regarding the burrs were made by images and analysis of variance, while the circularity was discussed quantitatively. From the results, it was verified that the Brad & Spur presented burrs at the exit of the hole varying between 0,06 mm and 0,62 mm. As for the cutting efforts Brad & Sput obtained a minimum thrust force of 42 N. On the other hand, the twist drill with two edges presents a behaviour that can be easily modeled by means of mathematical equations. As for the circularity, the twist drill with two edges presented a minimum circularity of 0,01mm. During the presentation and discussion of the results, it was interpreted how the geometry of the drills influenced each result obtained.

Keywords: sandwich panels, drilling, geometry cutting tool, cutting parameters.

1. INTRODUÇÃO

Muito se conhece sobre aplicações de materiais metálicos, cerâmicos e poliméricos. Entretanto, novas tecnologias e desenvolvimento de produtos com características específicas têm criado a necessidade de materiais como os painéis sanduíche. Estes são materiais estruturais compostos por duas camadas externas ou faces, que são unidas a um núcleo espesso por meio de um adesivo, e são produzidos com a finalidade de obter as melhores características dos materiais selecionados, para que adquiram propriedades mecânicas específicas, como rigidez, tenacidade e resistência.

Os painéis sanduíche merecem destaque nas indústrias civil, naval, aeroespacial e de transportes, devido à possibilidade de aplicação em condições especiais de operação. O material estudado é o painel sanduíche de alumínio e polietileno, aqui denominado Polietileno Alumínio - Laminado (PEALL), normalmente aplicado em revestimentos de fachadas, túneis e revitalização de edifícios.

A operação de furação é utilizada para a união secundária de materiais sanduíche, devido à necessidade de unir estruturas e conceber um produto final. A furação está presente em praticamente toda a indústria, já que furos são necessários para encaixe de peças e de parafusos, rebites, sobreposição, abertura, dentre outras finalidades. Neste trabalho, foram utilizadas brocas com geometrias diferentes, a fim de avaliar e comparar o seu desempenho durante a furação do PEALL. A escolha de uma geometria adequada permite otimizar os resultados gerados pela operação de furação.

A furação de materiais sanduíche pode apresentar diversos problemas no furo, como erros de circularidade, formação de rebarbas, delaminação, defeitos por temperatura, ou outras características inerentes ao processo, que são apresentadas neste estudo. Outro aspecto abordado foi a interação que acontece por meio do contato da ferramenta de metal duro e o painel sanduíche, gerando mecanismos de desgaste.

Também foi apresentada uma análise para a força de avanço, pois sua redução propicia aumento da vida útil da ferramenta de corte, bem como melhora a qualidade do furo. Esta análise foi feita por meio do comportamento gráfico da força

de avanço apresentada pelas brocas, análise de variância e elaboração de equações de regressão para cada broca, buscando um modelo que representasse o comportamento da força de avanço quando submetida a diferentes parâmetros de corte.

Além disso, também foram analisadas, quantitativa e qualitativamente, as rebarbas geradas na saída do furo, comparando o desempenho das brocas de geometrias diferentes. Apresentou-se o erro de circularidade por meio de análise de variância, e os cavacos, por meio de imagens, para identificar a forma correspondente para cada broca.

De maneira geral, este estudo permitiu um conhecimento aprofundado a respeito da influência de geometrias de ferramentas sobre a furação de um material sanduíche e buscou explicar diferentes características que podem ser observadas durante a operação de furação.

1.1. Objetivo geral

O objetivo geral da presente pesquisa foi o estudo da furação de um material sanduíche de polietileno e alumínio, PEALL (Polietileno – Alumínio Laminado), utilizando brocas com geometrias diferentes, denominadas *Brad & Spur*, helicoidal com duas arestas e helicoidal com três arestas.

1.1.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos foram:

- Analisar o perfil gráfico da força de avanço apresentado por cada broca;
- Realizar análises de variância a fim de estabelecer a influência da geometria das brocas e dos parâmetros de corte (velocidade de corte e avanço) sobre as variáveis resposta: força de avanço, altura da rebarba e circularidade;
- Para a variável resposta força de avanço, elaborar uma análise de regressão linear múltipla para identificar a influência da velocidade de corte e do avanço sobre a força de avanço para cada uma das brocas estudadas;
- Analisar qualitativamente os cavacos gerados na furação do PEALL.

1.2 Estrutura do trabalho

Este trabalho está dividido em seis capítulos, de acordo com os tópicos a seguir.

O Capítulo 1 contém a introdução, onde é feita uma apresentação inicial do tema e discutida a importância do material estudado e da operação de furação, além da explicação sobre os objetivos gerais e específicos.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre o tema estudado, onde são abordados os principais materiais sanduíche encontrados na indústria, bem como suas aplicações. Em seguida, é feita uma breve apresentação sobre usinagem e furação. Sobre a furação, apresentam-se as diferentes brocas que podem ser utilizadas para a operação, bem como os materiais pelos quais elas podem ser constituídas. Também são tratados assuntos como tribologia, formação de cavacos, forças na furação e aspectos relacionados à qualidade dos furos.

O Capítulo 3 aborda o procedimento experimental, onde são descritos os equipamentos utilizados, o material estudado, as ferramentas de corte e os métodos estatísticos empregados para interpretar os resultados.

No Capítulo 4, os resultados e discussões, por meio de análises qualitativas e quantitativas.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões da pesquisa, destacando a importância dos resultados obtidos.

No Capítulo 6, sugerem-se novas pesquisas relacionadas ao tema estudado, a fim de que se possa dar continuidade aos resultados aqui descritos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta os conceitos iniciais sobre materiais sanduíche e o processo de fabricação por usinagem empregando uma de suas operações, a furação. São apresentados os conceitos sobre brocas helicoidais padrão, bem como brocas com geometrias especiais que têm sido aplicadas na furação de materiais semelhantes ao estudado. Também são mostrados os principais materiais utilizados para ferramentas de corte, com uma abordagem sobre o metal duro, considerando os principais mecanismos de desgaste quando esta ferramenta é utilizada na furação de materiais estruturais. Em seguida, os conceitos de formação de cavacos e forças na furação, contextualizando com estudos que se assemelham à presente pesquisa. Por fim, são descritas algumas características inerentes à furação de materiais sanduíche, como a delaminação, rebarbas, circularidade e problemas decorrentes da temperatura.

2.1 Materiais na indústria metal-mecânica

Na indústria metal mecânica, estão disponíveis diversos tipos de materiais que se diferenciam uns dos outros pelo custo de fabricação, desempenho, composição química, formas de processamento e microestrutura. Os materiais são escolhidos devido às características físicas e químicas, que podem melhorar o desempenho de um produto final. A Figura 2.1 representa a classificação dos materiais. Neste trabalho, estudaram-se os materiais estruturais sanduíche que têm sido aplicados nas indústrias civil, aeronáutica e automobilística.

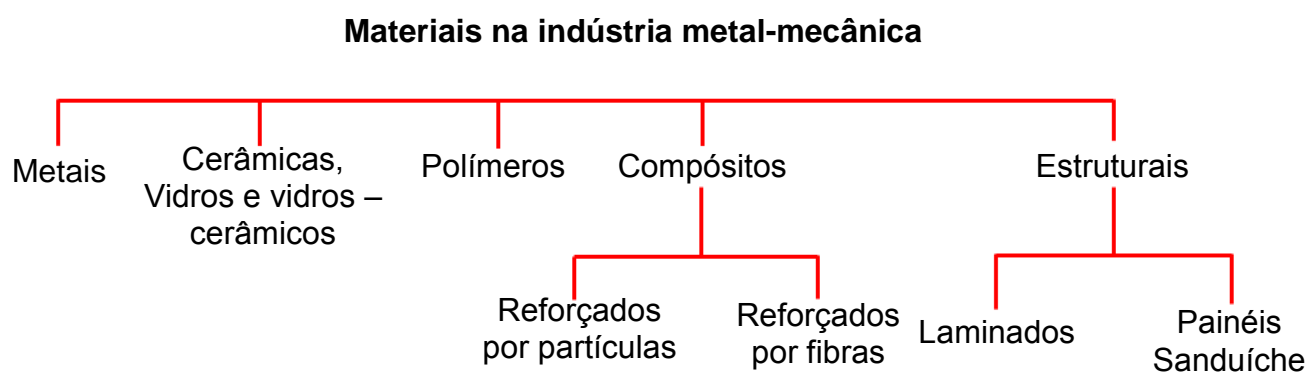


FIGURA 2.1 - Materiais na indústria.

Para Callister (2008), materiais estruturais normalmente são compostos de materiais homogêneos, que combinam as características de dois ou mais materiais constituintes. Os materiais compósitos, por sua vez, podem ser reforçados por fibras ou partículas, cujas propriedades não dependem somente das propriedades dos materiais constituintes, mas também do desenho geométrico dos vários elementos estruturais pelos quais foram fabricados.

Dentro da classificação de materiais estruturais, estão os laminados ou painéis sanduíche. Os materiais estruturais laminados consistem em duas ou mais camadas de materiais empilhados uns nos outros e posteriormente cimentados, enquanto os painéis sanduíche fundamentam-se em duas placas externas e um material de núcleo, sendo as camadas unidas por meio de um adesivo (CALLISTER, 2008).

2.1.1 Aplicações de materiais estruturais

Alguns dos materiais estruturais aplicados nas indústrias são o ACM - material composto de alumínio (*aluminium composite material*), boral, painéis mdf, fibra de kevlar, entre outros.

O ACM, material semelhante ao utilizado neste estudo, fundamenta-se em duas camadas de alumínio e um material polimérico como recheio, podendo ser de alta ou baixa densidade. Os materiais são unidos uns aos outros por meio de adesivos, em vez de processos tradicionais de junção, o que permite, entre outras vantagens, menor peso, distribuição uniforme da tensão, impermeabilização e eliminação de corrosão (ARENAS *et al.*, 2013). Devido principalmente à rapidez na instalação, possibilidade de moldagem, variedade de cores e relativa facilidade na manutenção, o ACM tem sido uma opção de revestimento bastante adotada em fachadas de edifícios comerciais, bem como na indústria aeronáutica (GOUVEIA & SPOSTO, 2015).

Materiais que se assemelham ao ACM são os painéis sanduíche de alumínio reforçado com borracha, como BORAL (borracha- alumínio), que consistem em lâminas externas de alumínio e borracha vulcanizada como núcleo. Rubio *et al.* (2015) consideraram o desempenho mecânico deste material comparável ao do ACM, somado ao caráter sustentável por meio da utilização de borracha reciclada. O BORAL pode ser utilizado em setores da construção civil, automotivo e naval.

Os painéis MDF - painéis de fibra de densidade média (*medium density fiberboard*) são placas de fibra de madeira de densidade média, cujas fibras de madeira com resina são unidas por meio de pressão e calor. Estes produtos têm substituído a madeira maciça no mercado imobiliário, o que permite uma política de melhor preservação dos recursos naturais disponíveis (XAVIER *et al.*, 2012).

Outro material também conhecido é o *Kevlar*, constituído de 20 a 50 camadas de polieterimida e polipropileno. É um material com alta resistência à tração e rigidez. As fibras de *Kevlar* são melhores que o aço em termos de resistência à tração e módulo de elasticidade, além de apresentarem baixo peso específico, como mostrado na TAB. 2.1. O *Kevlar* é utilizado como matéria-prima para produtos de proteção contra balas, como o colete à prova de balas, em função do alto desempenho para absorção de energia, alta resistência e baixa densidade (CHOUHAN *et al.*, 2016).

TABELA 2.1- Propriedades mecânicas do Kevlar e do aço (KENDALL, 1999)

Propriedades	Kevlar	Aço CA-50
Resistência à tração (MPa)	3600	550
Módulo de elasticidade (GPa)	130	210
Peso específico (kN/m ³)	14,4	78,5

2.2 Painéis sanduíche

Diante da necessidade de reduzir tempos de montagem e quantidade de peças, é possível combinar força, rigidez, características térmicas e acústicas em um único processo de fabricação, podendo-se criar um material que combine as características de dois ou mais materiais, ou seja, criar materiais como os compósitos e estruturais.

Askeland *et al.* (2011) consideram que materiais sanduíche são constituídos por finas camadas de um material revestido unido a um material de enchimento de baixo peso, tal como uma espuma polimérica. Uma característica importante é que os materiais isolados não são fortes e rígidos, mas, quando combinados na estrutura sanduíche, conseguem adquirir esta propriedade. Um exemplo familiar é o papelão ondulado, em que um núcleo de papelão ondulado de papel é combinado com um papel liso e grosso. Isoladamente, o papel grosso e o

papelão não são suficientemente rígidos, mas a combinação dos dois materiais possui esta propriedade.

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 plásticas reforçadas com fibras, ou seja, materiais de alto desempenho. Os materiais do núcleo são de baixa densidade, como polímeros, madeiras e colmeias. A FIG. 2.2 ilustra o material sanduíche com núcleo na forma de colmeia.

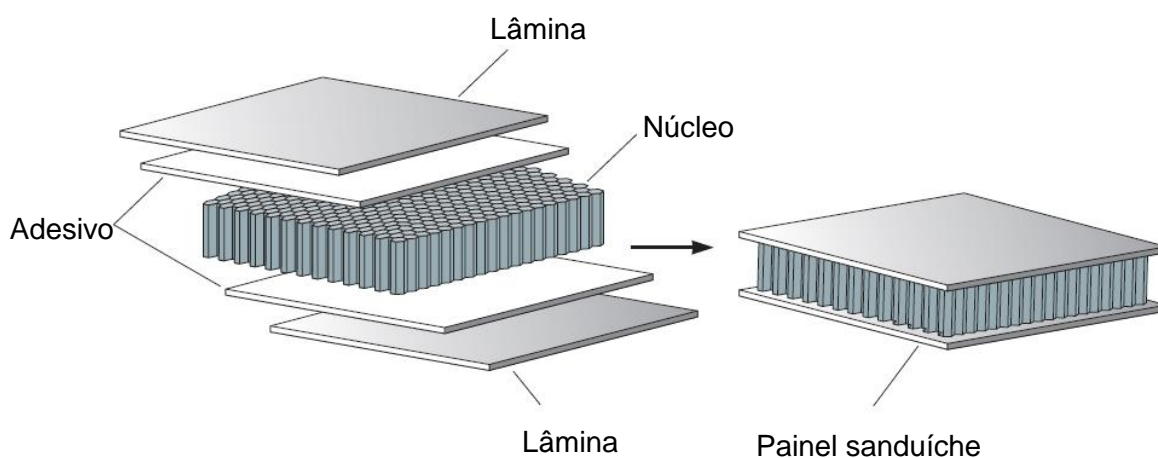


FIGURA 2.2 - Constituição de painel sanduíche (ASKELAND *et al.*, 2011).

Para Callister (2008), as lâminas de um painel sanduíche são responsáveis por suportar a maior parte da carga para dentro do plano, assim como as tensões de flexão transversais. O núcleo é utilizado para separar as faces e resistir a deformações perpendiculares ao plano da face, proporcionando rigidez contra o cisalhamento ao longo dos planos que são perpendiculares às lâminas.

Ao conceber qualquer material estrutural, as propriedades devem ser bem definidas e entendidas. Um projetista pode construir um painel sanduíche de acordo com sua finalidade, o que resulta em um produto para aplicação específica. O processo de fabricação dos painéis sanduíche propicia ao material boas características de resistência e isolamento térmico e acústico, podendo ser uma alternativa vantajosa em relação a outros tipos tradicionais de construção, como os que utilizam paredes de alvenaria ou sistemas pré-fabricados de concreto, por exemplo (GAGLIARDO e MASCIA, 2010).

2.3 Usinagem de materiais sanduíche

Dentre os processos de fabricação pelos quais os materiais sanduíche são trabalhados, a usinagem contribui significativamente para seu desenvolvimento.

Segundo Ferraresi (1977), as operações de usinagem são responsáveis por conferir à peça forma, dimensões ou acabamento, ou, ainda, a combinação qualquer destes três itens, produzindo cavacos.

Dentre as operações de usinagem, são conhecidas a furação, fresamento, torneamento, roscamento, alargamento, brochamento, serração, aplainamento, entre outras.

2.3.1 Operação de furação

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, podendo ser preciso realizar furos 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.

2.3.2 Elementos da broca helicoidal

De modo simplificado, uma broca helicoidal é composta por uma haste, que é utilizada para a sua fixação, e uma parte cortante.

Com relação à geometria das ferramentas de corte, definem-se, segundo a norma ABNT NBR 3002-1 (2013), os elementos da cunha cortante e os ângulos de uma broca helicoidal, apresentados na FIG. 2.3 e definidos a seguir:

- $A\gamma$ – superfície de saída;
- $A\alpha$ – superfície de folga, e $A'\alpha$ – superfície de folga secundária;
- S – aresta principal de corte, e S' – aresta secundária de corte;
- χ_r - ângulo de posição, e χ'_r - ângulo de posição secundário;

- ϵ_r - ângulo de ponta;
- α_o - ângulo de folga;
- β_o - ângulo de cunha;
- γ_o - ângulo de saída.

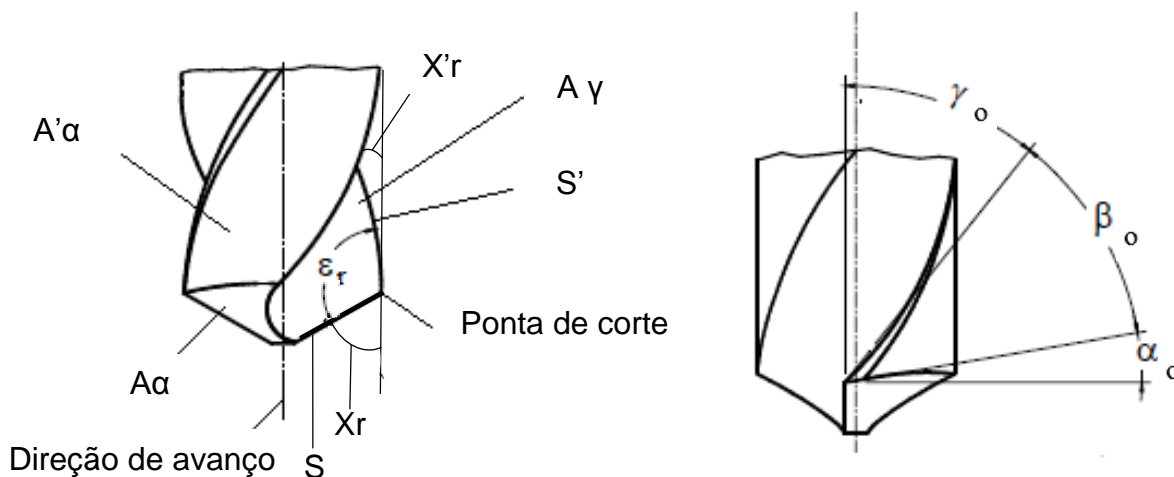


FIGURA 2.3 - Elementos da cunha cortante e ângulos de uma broca helicoidal (Modificado de Diniz *et al.*, 2012).

2.4 Brocas com geometrias especiais

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 FIG. 2.4.

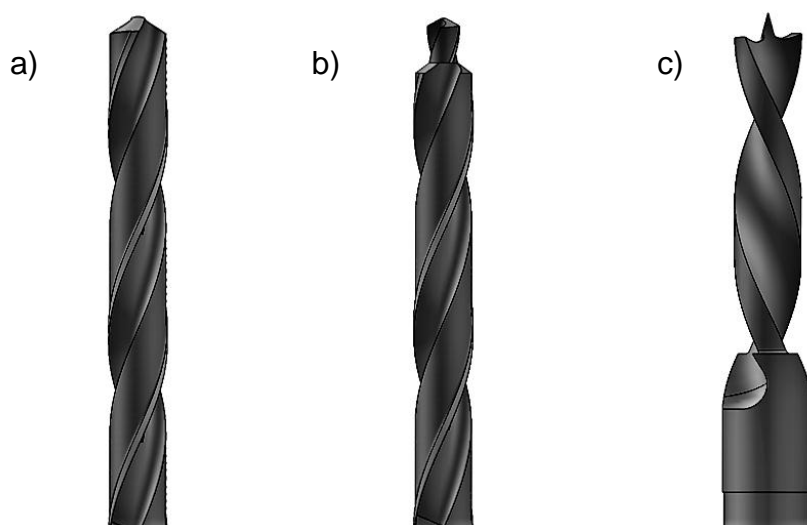


FIGURA 2.4 - Brocas com geometrias diferentes: (a) helicoidal, (b) escalonada, (c) *Brad & Spur*.

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.

Albuquerque *et al.* (2009) utilizaram, na furação de carbono epóxico laminado, quatro tipos de brocas: helicoidal, escalonada, *Brad & Spur* (FIG 2.4 a, b e c) e broca tipo punhal, mostrada na FIG 2.5. A broca que apresentou os melhores resultados com relação às forças de corte e delaminação foi a *Brad & Spur*. Segundo os autores, ela foi originalmente desenvolvida para a furação de madeira. Com a geometria pontiaguda do ponto central de corte, as fibras do material são tensionadas de tal maneira a gerar um corte limpo e uma superfície usinada suave.

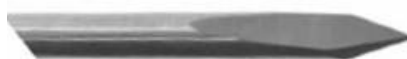


FIGURA 2.5 - Broca punhal utilizada por Albuquerque *et al.* (2009).

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. O autor observou que esta broca obteve forças de avanço maiores quando comparada às demais (helicoidal com duas arestas e *Brad & Spur*). Isto pode ser explicado pela sua geometria, já que possui um ângulo de ponta de 150° e um ângulo de posição (X_r) de 75° , considerados altos e responsáveis pelo aumento da força de avanço.

Outros autores também utilizaram brocas helicoidais com três arestas de corte. Ema *et al.* (1991) e Agapiou (1993) empregaram a broca helicoidal com três arestas e destacaram que a qualidade dos furos gerados por ela é maior quando comparada ao desempenho da helicoidal com duas arestas. Agapiou (1993) constatou ainda que as vibrações da máquina são menores para a broca helicoidal com três arestas, que não geram marcas nos furos.

Confrontando os resultados de Faria (2007), Ema *et al.* (1991) e Agapiou (1993), pode-se dizer que as brocas helicoidais com três arestas podem apresentar forças de avanço altas; entretanto, a qualidade dos furos alcançada por esta broca é maior quando comparada à broca helicoidal padrão.

2.5 Materiais para ferramentas de corte

Os materiais para ferramentas de corte devem ser escolhidos de modo a garantir eficiência na operação, aumento de vida da ferramenta e otimização da operação como um todo. É de fundamental importância a escolha do material adequado, para que o processo de usinagem atenda aos requisitos de qualidade da peça final.

A pesquisa de novos materiais para ferramentas de corte tem conduzido ao aumento da velocidade de corte, das taxas de avanço e da vida das ferramentas, permitindo, assim, elevar a produtividade na operação de furação. Essa evolução pode ser vista no GRA 2.1. Observa-se que, na primeira metade do século XX, ocorreu maior evolução das velocidades de corte.

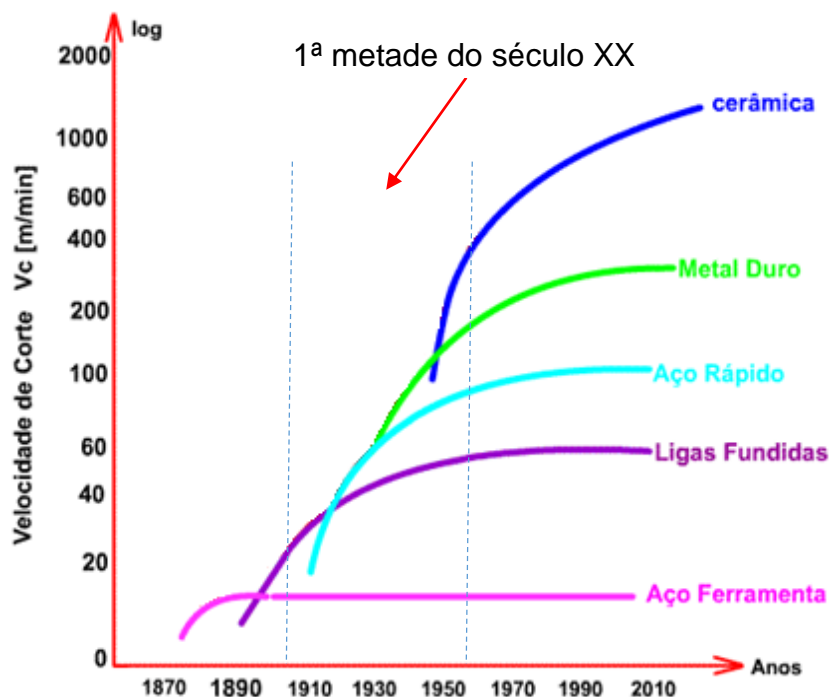


GRÁFICO 2.1 - Evolução de materiais para ferramentas de corte e velocidades de trabalho aplicadas (CIMM, 2016).

As propriedades dos materiais para ferramentas de corte devem ser analisadas de acordo com suas aplicações. É preciso considerar o módulo de elasticidade na definição da rigidez elástica da ferramenta: quanto maior, menor será a variação elástica durante o carregamento da ferramenta. A dureza está relacionada à resistência ao desgaste abrasivo, e a tenacidade é a resistência ao impacto. Normalmente, alta dureza está associada a uma baixa tenacidade. O coeficiente de dilatação térmica e a condutividade térmica indicam a resistência ao choque térmico, isto é, quanto menor o coeficiente de dilatação e maior a condutividade térmica, maior a resistência ao choque térmico (MACHADO *et al.*, 2015).

A TAB 2.2 apresenta as propriedades mecânicas dos principais materiais utilizados em ferramentas de corte: aço rápido M2 (HSS), metal duro (carboneto de tungstênio M20), alumina branca ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$), alumina mista ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC} + \text{ZrO}_2$), alumina reforçada com whisker ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$), alumina de nitreto de silício ou Sialon ($\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Al}_2\text{O}_3$), PCBN (nitreto cúbico de boro policristalino – *polycrystalline cubic boron nitride*) e PCD (diamante sintético policristalino – *polycrystalline diamond*) para ferramentas de corte.

TABELA 2.2 - Dados quantitativos das principais propriedades das ferramentas de corte (ABRÃO, 1995).

Propriedades	HSS	Metal Duro	Cerâmica				PCBN	PCD
			Branca	Mista	Sic	Sialon		
Dureza a 25 °C (HV)	850	1600	1700	1900	2000	1600	4000	8000 a 10000
Dureza a 1000°C (HV)	-	400	650	800	900	900	1800	-
Tenacidade a Fratura (MPa)	17	13	1,9	2	8	6	10	7,9
Condutividade Térmica (W/m°C)	37	85	8 a 10	12 a 18	32	23	100	560
Módulo de Young (kN/mm²)	250	580	380	420	390	300	680	841
Coef. de Expansão Térmica (x10)	12	5,5	8,5	8	6,4	3,2	4,9	3,8

O aço rápido possui altos percentuais de elementos de liga, como tungstênio (W), molibdênio (Mo), cromo (Cr), cobalto (Co), vanádio (V) e nióbio (Nb). Conforme a TAB 2.2, tem como características a elevada dureza e a tenacidade, podendo ser usado em temperaturas de até 600° (DINIZ, 2012). Astakhov (2014) destaca as seguintes especificidades para brocas de aço rápido: menor trabalho de endurecimento, melhor qualidade da superfície usinada, forças de corte mais baixas e menores temperaturas de operação.

O metal duro, que é detalhado na próxima seção, trata-se de uma liga de carboneto de tungstênio (WC) e cobalto (Co) produzida pela metalurgia do pó através de prensagem e sinterização. É composto por uma mistura de pós e aglomerados, que podem ser o cobalto (Co), ferro (Fe) ou níquel (Ni) e, ainda, uma combinação entre eles (FERRARESI, 1977). Dureza e tenacidade à fratura são propriedades mecânicas importantes do metal duro, que também oferece resistência à flexão, resistência ao desgaste e resistência ao impacto (FANG e SOHN, 2009).

As cerâmicas são materiais refratários e têm uma dureza maior que a do metal duro, porém são frágeis. Possuem um bom desempenho quando aplicadas na usinagem de ferro e aço (SHAW, 1984). Diniz *et al.* (2012) destacam sua excelente estabilidade química, o que evita a difusão e é muito importante quando se usina em

altas velocidades e temperaturas. No entanto, elas apresentam baixa condutividade térmica, o que dificulta a transferência de calor e aquece a região próxima do contato cavaco-ferramenta e peça-ferramenta.

Comparado às cerâmicas, o PCBN (ou CBN) tem maior dureza e resistência ao desgaste. Mas sua resistência química é um fator limitador. Por essa razão, quando esse material é aplicado em operações de corte em que a estabilidade química é um critério primordial, recomenda-se uma classe de CBN contendo um pouco de cerâmica. O problema de elevada afinidade química ocorre principalmente na usinagem de aços de baixa dureza e, nesse caso, o desgaste da ferramenta é pronunciado, promovido por mecanismos de desgaste, principalmente a difusão. A sua dureza é a segunda maior, perdendo apenas para o diamante, e pelo menos duas vezes maior que a dos outros materiais de corte (CIMM, 2016).

O PCD também tem sido empregado para operações de furação, com a vantagem de possuir um alto valor de condutividade térmica (1 a 5 vezes o valor do metal duro classe K), dificultando a formação de pontos quentes na ferramenta, alta dureza (4 vezes a do metal duro classe K) e alta resistência ao desgaste por abrasão. Porém, as desvantagens são a propriedade de anisotropia, que torna necessária uma cuidadosa lapidação do PCD para que a direção mais resistente coincida com aquela que está resistindo aos esforços de corte, além do fato de o diamante reagir com o ferro em temperaturas moderadas e do alto custo quando comparado ao metal duro, por exemplo. Pode ser utilizado para usinagem de metais não ferrosos e/ou não metálicos, como ligas de alumínio e cobre, plásticos abrasivos, resinas reforçadas com fibras de carbono e vidro, cerâmicas, metais duros, madeira abrasiva, pedras naturais e concreto (DINIZ, 2012).

2.5.1 Ferramentas de corte de metal duro

Um dos materiais para ferramentas de corte com grande aplicabilidade na furação é o metal duro. As primeiras aplicações do metal duro ocorreram na Alemanha e nos Estados Unidos em 1928 (SHAW, 1984).

As vantagens do metal duro são sua boa homogeneidade, decorrente do processo de fabricação por metalurgia do pó, combinação de dureza à temperatura ambiente, dureza a quente, resistência ao desgaste e tenacidade - combinação possível de se obter pela variação de sua composição (FERRARESI, 1977).

Ferramentas de metal duro têm sido amplamente utilizadas como ferramentas de corte em materiais com difícil usinabilidade, pois os parâmetros de microestrutura das ferramentas de metal duro influenciam seu desempenho no processo de corte (CUI *et al.*, 2016).

A norma ISO 513: (2004) classifica o metal duro em seis classes, representadas pelas letras P, M, K, N, S e H, conforme sua aplicação na usinagem e as características de formação de cavaco. Dentro de cada classe, há subdivisões designadas por números de 1 a 50 que representam as propriedades de resistência ao desgaste e a tenacidade. Os números menores identificam as classes mais resistentes ao desgaste, enquanto os maiores, as mais tenazes.

As brocas utilizadas neste trabalho são da classe K, que contém WC e Co e são indicadas para a usinagem de materiais como o ferro fundido cinzento, maleável e outros que produzem cavaco curto. Brocas inteiriças de metal duro são utilizadas para furos com diâmetro abaixo de 20 mm. Caso a máquina possua rotação, rigidez e potência suficientes, as brocas de metal duro permitem a obtenção de furos mais precisos, não sendo necessário utilizar furos de centro ou pré-furos (DINIZ *et al.*, 2012).

Na presente pesquisa, empregaram-se ferramentas de metal duro sem revestimento para furação do material sanduíche alumínio/polietileno. A seção seguinte aborda as principais interações entre as ferramentas de metal duro e o material sanduíche.

2.6 Formação de cavacos

A formação do cavaco influencia diversos fatores ligados à usinagem, como o desgaste da ferramenta, os esforços de corte, o calor gerado na usinagem, a penetração do fluido de corte, dentre outros. Estão ainda relacionados com o processo de formação do cavaco aspectos econômicos e de qualidade da peça, segurança do operador, utilização adequada da máquina-ferramenta, etc. (DINIZ *et al.*, 2012).

As características do material a ser usinado, tais como a estrutura e a ductilidade, são decisivas na formação do cavaco, assim como a geometria da ferramenta e as condições de corte. Os cavacos são classificados quanto ao tipo e à forma. De acordo com Ferraresi (1977), quanto ao tipo, os cavacos podem ser contínuos, descontínuos ou segmentados.

Os cavacos contínuos são formados na usinagem de materiais dúcteis, como aços de baixa liga, alumínio e cobre. Já os cavacos descontínuos são comuns na usinagem de materiais frágeis, como bronze e ferros fundidos cinzentos, uma vez que não suportam grandes deformações sem se quebrar. Os cavacos segmentados caracterizam-se por grandes deformações continuadas em estreitas bandas entre segmentos com pouca ou quase nenhuma deformação em seus interiores (FERRARESI, 1977).

Gaitonde *et al.* (2011) estudaram a furação de poliamida sem reforço (PA66) e poliamida reforçada com 30% de fibra de vidro (PA66 GF30), utilizando ferramentas de metal duro. Segundo os autores, durante a furação de materiais compósitos e estruturais, várias camadas de material são cortadas e, conseqüentemente, diferentes mecanismos de formação de cavacos podem ser identificados. Para o PA66, sob baixos avanços, os cavacos são contínuos e o cisalhamento ocorre no sentido das fibras do material de reforço. Para avanços altos, os cavacos são descontínuos, e o cisalhamento ocorre na direção perpendicular às fibras. Na FIG 2.6, a mudança na forma do cavaco é evidenciada quando o avanço diminui.

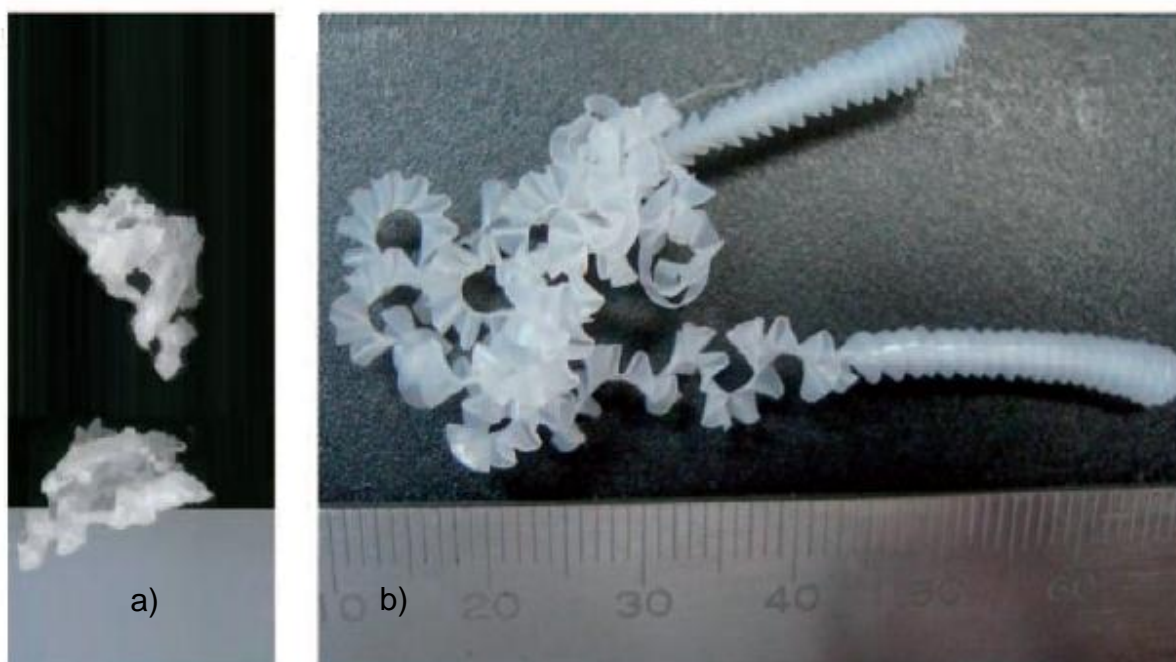


FIGURA 2.6 - Cavacos obtidos na furação de PA66 para a velocidade de corte 63 m/min sob diferentes avanços: a) 2,25 mm/rev b) 4 mm/rev (GAIATONDE *et al.*, 2011).

Quanto à classificação pela forma, os cavacos podem ser denominados em fita, helicoidais, em espiral, em lascas ou pedaços. A norma ISO 3685 (1993) classifica detalhadamente as formas de cavaco, de acordo com a FIG. 2.7.

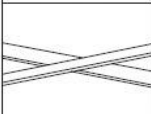



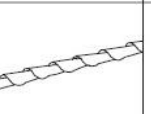

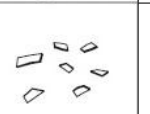
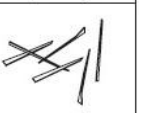

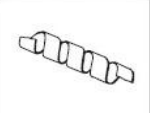








1- Cavaco em fita	2- Cavaco tubular	3- Cavaco espiral	4- Cavaco hel. tipo arruela	5- Cavaco hel. cônico	6- Cavaco em arco	7- Cavaco fragmentado	8- Cavaco tipo agulha
							
1-1- Longo	2-1- Longo	3-1- Plano	4-1- Longo	5-1- Longo	6-1- Conect.		
							
1-2- Curto	2-2- Curto	3-2- Cônico	4-2- Curto	5-2- Curto	6-2- Solto		
							
1-3- Emaranhado	2-3- Emaranhado		4-3- Emaranhado	5-3- Emaranhado			

FIGURA 2.7 - Formas de cavacos produzidos na usinagem dos metais (ISO 3685, 1993).

Com relação à influência dos parâmetros de corte sobre a forma dos cavacos, um aumento da velocidade de corte, uma redução no avanço ou um aumento no ângulo de saída tendem a mudar as formas da direita para a esquerda, como mostrado na FIG 2.7. O avanço é o parâmetro mais influente, seguido pela profundidade de corte, a afetar a forma do cavaco (MACHADO *et al.* 2015).

A classificação quanto à forma do cavaco é importante devido às características desejadas durante a usinagem. Os cavacos de forma longa podem causar danos à segurança do operador, bem como à qualidade da peça, sendo necessário maior controle. No processo de usinagem, esperam-se cavacos curtos, que se fragmentem facilmente e não causem danos à qualidade da peça usinada, nem ao operador.

Além de identificar o tipo e a forma dos cavacos, também é importante analisar a sua espessura. Machado *et al.* (2015) explicam que, quanto menor for a espessura do cavaco, mais flexível ele é, portanto, maior será a dificuldade de quebra. Os cavacos que já sofreram intensas deformações, passando pelas zonas primárias e secundárias de cisalhamento, necessitam de uma deformação crítica (ϵ_f) para se quebrarem depois de deixar a superfície de saída da ferramenta.

2.7 Aspectos tribológicos (interação entre metal duro e PEALL)

O movimento entre superfícies sólidas é de fundamental importância para o funcionamento de diversos mecanismos. A tribologia engloba o estudo do atrito, desgaste e lubrificação e é definida como a ciência e tecnologia da interação entre superfícies em movimento relativo e as respectivas práticas que envolvem o processo (ZUM GAHR, 1987).

De acordo com Hutchings (1992), o atrito é entendido como a resistência encontrada por um corpo ao se movimentar contra outro corpo. Sob determinadas condições de deslizamento, o coeficiente de atrito μ dado para um par de materiais sob condições fixas, com ou sem lubrificação, é constante.

De acordo com Bayer (1994), o desgaste é um fenômeno de superfície, e existem inúmeras propriedades ou características das superfícies que podem afetar tanto o comportamento como as transições, devido a ele. Entre as propriedades que levam ao desgaste, têm-se as características geométricas (forma geral dos corpos e forma e distribuição das asperezas), propriedades mecânicas (módulo elástico, dureza e parâmetros de fadiga), características físicas (encruamento, difusão e parâmetros de rede) e características químicas (composição e polaridade da superfície).

A avaliação dos mecanismos de desgaste permite prever o comportamento de materiais quando submetidos a processos de fabricação por usinagem, tal como a operação de furação envolvendo brocas de metal duro em materiais sanduíche.

As ferramentas de corte estão sujeitas a um desgaste progressivo tanto na superfície de folga quanto na superfície de saída da ferramenta (MACHADO *et al.*, 2015). O desgaste ocorre devido aos mecanismos de desgaste apresentados na FIG. 2.8, em função da temperatura.

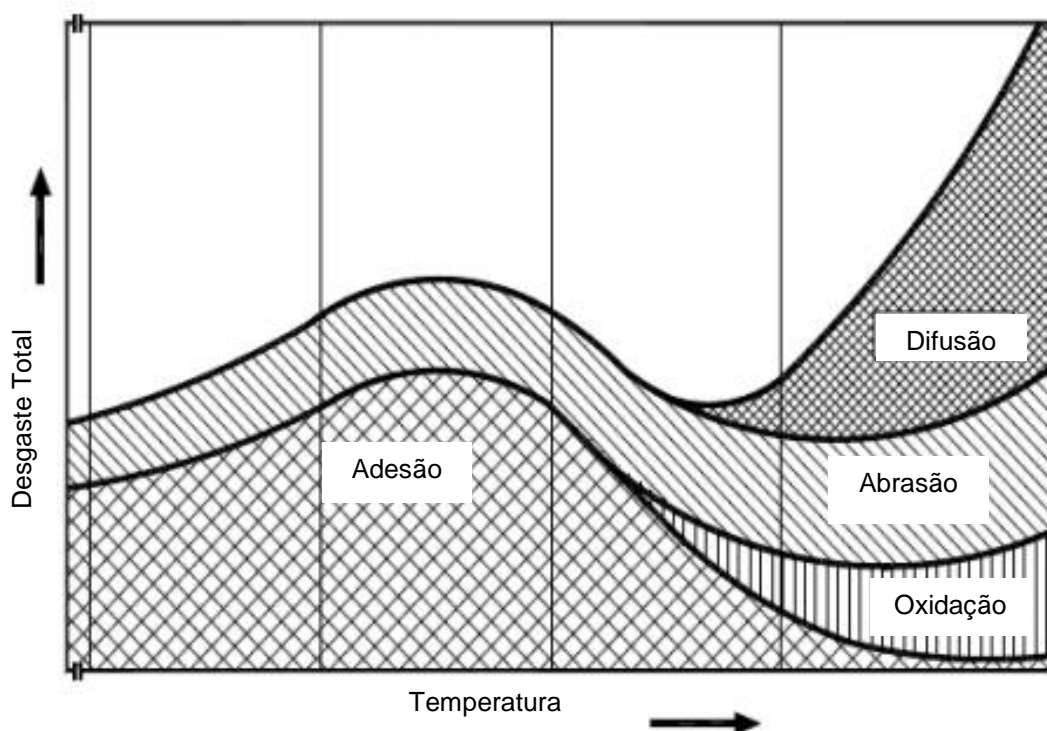


FIGURA 2.8 - Mecanismos de desgaste em ferramentas de corte em função da temperatura (VIEREGGE apud KÖNIG e KLOCKE, 1997).

O desgaste por adesão ocorre quando uma superfície desliza sobre outra e está relacionado ao contato e à interação entre as asperezas de duas superfícies. Nestas situações, geram-se forças de atração nos pontos de contato das asperezas, que podem ser de caráter covalente, iônico, metálico ou pelas forças de Van der Waals. Como a área de contato nas asperezas é muito pequena, desenvolvem-se localmente altas pressões de contato que provocam deformação plástica, adesão e, conseqüentemente, a formação de junções localizadas (HUTCHINGS, 1992).

De acordo com Kalin e Jerina (2015), a adesão em superfícies de alumínio (transferência de ligas de alumínio para a superfície de saída de uma ferramenta) é a principal razão para a falha da ferramenta e a má qualidade da superfície de alguns produtos, principalmente sob altas temperaturas.

Diversos autores identificaram adesão na furação de materiais que apresentam alumínio em sua composição utilizando brocas de metal duro. Zitoune *et al.* (2010) realizaram a furação PRFC/Al (polímero reforçado com fibra de carbono empilhado com alumínio) e constataram que os principais mecanismos de desgaste advindos do processamento do alumínio são: aresta postiça de corte, camada aderente e difusão. Em velocidades menores que 25 m/min, as arestas postiças são

formadas na superfície de saída da ferramenta, quando esta assume a função do corte.

A força de atrito deve levar em consideração tanto a força de adesão quanto a força de deformação (HUTCHINGS, 1992). De acordo com Machado *et al.* (2015), a adesão ocorre, geralmente, em baixas velocidades de corte, nas quais o fluxo de material sobre a superfície de saída da ferramenta torna-se irregular. A aresta postiça de corte (APC) pode aparecer, e na sua presença o processo tem natureza menos contínua, principalmente se ela for instável. Sob tais condições, fragmentos microscópicos são arrancados da superfície da ferramenta e arrastados junto ao fluxo de material adjacente à interface.

Zum Gahr (1987) define abrasão como a penetração de partículas duras ou asperezas das superfícies de um corpo duro em superfícies macias de um sólido em contatos de deslizamento. Dependendo do tribossistema, o desgaste pode ser causado por uma combinação dos quatro mecanismos básicos: abrasão, adesão, fadiga superficial e reações triboquímicas. Frequentemente, os danos superficiais pelo contato por riscamento de sólidos são chamados apenas de desgaste abrasivo, já que a abrasão é o mecanismo mais importante para o desgaste.

Montoya *et al.* (2013) realizaram a furação de PRFC/Al utilizando ferramentas de metal duro. Identificaram dois tipos de desgaste: abrasivo e adesivo. A abrasão foi o mecanismo de desgaste mais acentuado na furação de PRFC/Al, devido à característica altamente abrasiva das fibras de carbono.

Hutchings (1992) afirma que, para a maioria dos metais, são necessárias apenas velocidades de deslizamento moderadas para que regiões de alta temperatura sejam grandes o suficiente para formar óxido, os quais crescem até uma espessura crítica, formando camadas protetoras das superfícies que reduzem o contato metal-metal.

De acordo com Zum Gahr (1987), o atrito provocado pelo contato entre duas superfícies deslizando uma sobre a outra produz picos de temperatura nas áreas reais de contato. A magnitude dessas temperaturas depende da velocidade relativa das superfícies e dos materiais envolvidos.

O desgaste por difusão ocorre sob temperaturas elevadas e depende das propriedades químicas do material da ferramenta e da afinidade desta com o material da peça, além do tempo de contato. A difusão consiste na ocorrência de uma transferência de átomos de uma área de maior concentração atômica para outra de

menor concentração, entre superfícies que possuem afinidade química. Esta transferência pode levar ao enfraquecimento da ferramenta - por exemplo, pela formação de carbonetos complexos de tungstênio (HUTCHINGS, 1992).

2.8 Forças na furação

Muitas pesquisas sobre forças de furação têm sido feitas a fim de reduzir a potência necessária de corte, evitar danos desnecessários na operação e melhorar a qualidade dos furos. A força de usinagem depende de uma série de fatores, como material da peça, geometria, material e afiação da ferramenta, velocidade de corte, lubrificação, entre outros (FERRARESI, 1977).

De acordo com Bordin *et al.* (2011), considerando-se os esforços de corte atuantes a uma broca helicoidal, o momento torçor e a força de avanço são os principais esforços encontrados. São compostos pelos esforços parciais (como a resistência devido ao corte do material nas duas arestas principais de corte), resistência devido ao corte e esmagamento do material na aresta transversal e pelos atritos nas guias e entre a superfície de saída da broca e o cavaco. A apresentação dos esforços de corte decorrentes da operação de furação pode ser observada na TAB 2.3.

TABELA 2.3 - Esforços de corte na furação (DINIZ *et al.*, 2012).

	Arestas principais	Aresta transversal	Atritos
Momento Torçor	77 – 90%	3 – 10%	3– 13%
Força de Avanço	39 – 59%	40 – 58%	2 – 5%

Diversos autores têm desenvolvido estudos para prever a influência de geometria de corte sobre as forças de avanço na furação, sendo que a sua redução é desejável, já que diminui a potência necessária para a operação, minimiza vibrações e assegura maior qualidade do furo e vida útil à broca.

Durão *et al.* (2010) apresentaram um estudo de furação em materiais laminados utilizando 5 brocas de geometrias diferentes (helicoidal com ângulo de ponta de 120°, helicoidal com ângulo de ponta de 85°, *Brad & Spur*, punhal e escalonada) e avanços de 0,02; 0,06; e 0,012 (mm/rev).

Os resultados mostraram que o avanço tem influência direta sobre a força de avanço. Isto pode ser explicado pois a força de avanço é a projeção da força de

usinagem sobre o plano de trabalho, na direção de avanço, dada pela velocidade de avanço (MACHADO *et al.*, 2015). O GRA 2.2 ilustra o efeito do avanço sobre a força de avanço, considerando-se brocas com geometrias diferentes.

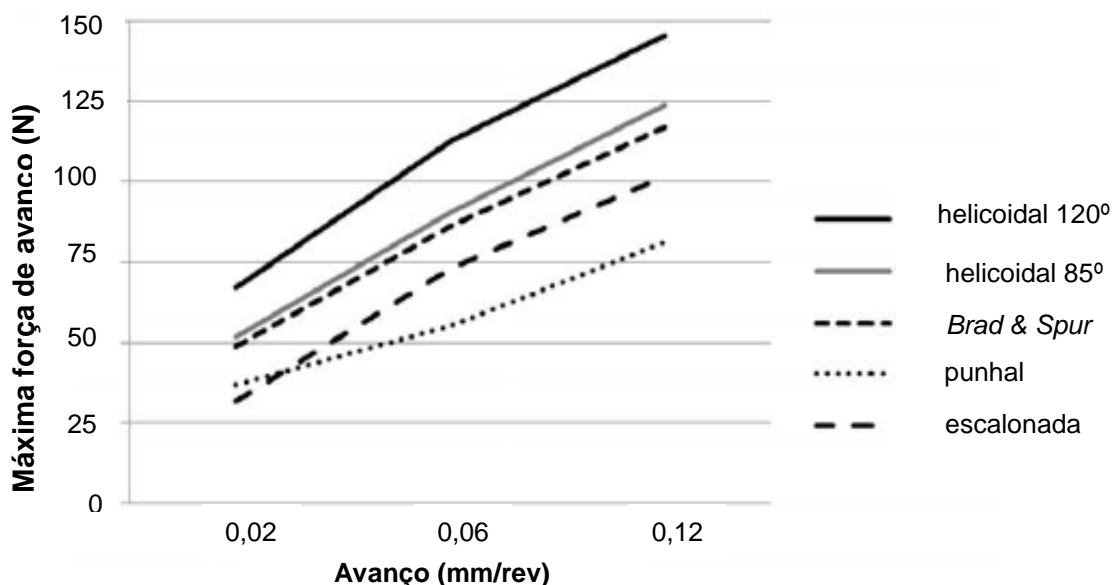


GRÁFICO 2.2 - Efeito do avanço sobre a máxima força de avanço (DURÃO *et al.*, 2010).

Observa-se que a geometria da broca que representa a menor variação entre força máxima e mínima de avanço é a broca punhal, enquanto que, na broca escalonada, o último valor é três vezes maior que o primeiro, sob o menor avanço.

Latha *et al.* (2011) estudaram a influência da geometria da broca na força de avanço durante a furação de polímero reforçado com fibra de vidro (PRFV). Utilizaram as brocas *Brad & Spur*, multifacetadas e escalonadas com diâmetros de 6, 8 e 10 (mm), rotações de 500, 1500 e 2500 (rpm) e avanços de 100, 300 e 500 (mm/min).

O estudo relatou a influência dos parâmetros: velocidade de rotação, avanço e diâmetro das brocas sobre a variável de resposta força de avanço, apresentados no GRA 2.3.

Verificou-se que o aumento da velocidade de rotação das brocas resultou em forças de avanço menores, para todas as ferramentas. Isso se deve ao fato de um aumento de calor na peça de trabalho, o que facilitou o corte. Este aumento do calor também foi possível pela baixa condutividade térmica do PRFV.

Com relação ao diâmetro das brocas, observou-se que, para diâmetros baixos, a geometria da broca não tem influência sobre a força de avanço, pois ela só

começa a ser observada em diâmetros maiores. O aumento do diâmetro aumentou a força de avanço nos três casos. Para o avanço, observou-se que a força de avanço aumenta proporcionalmente, já que existe uma relação direta entre eles.

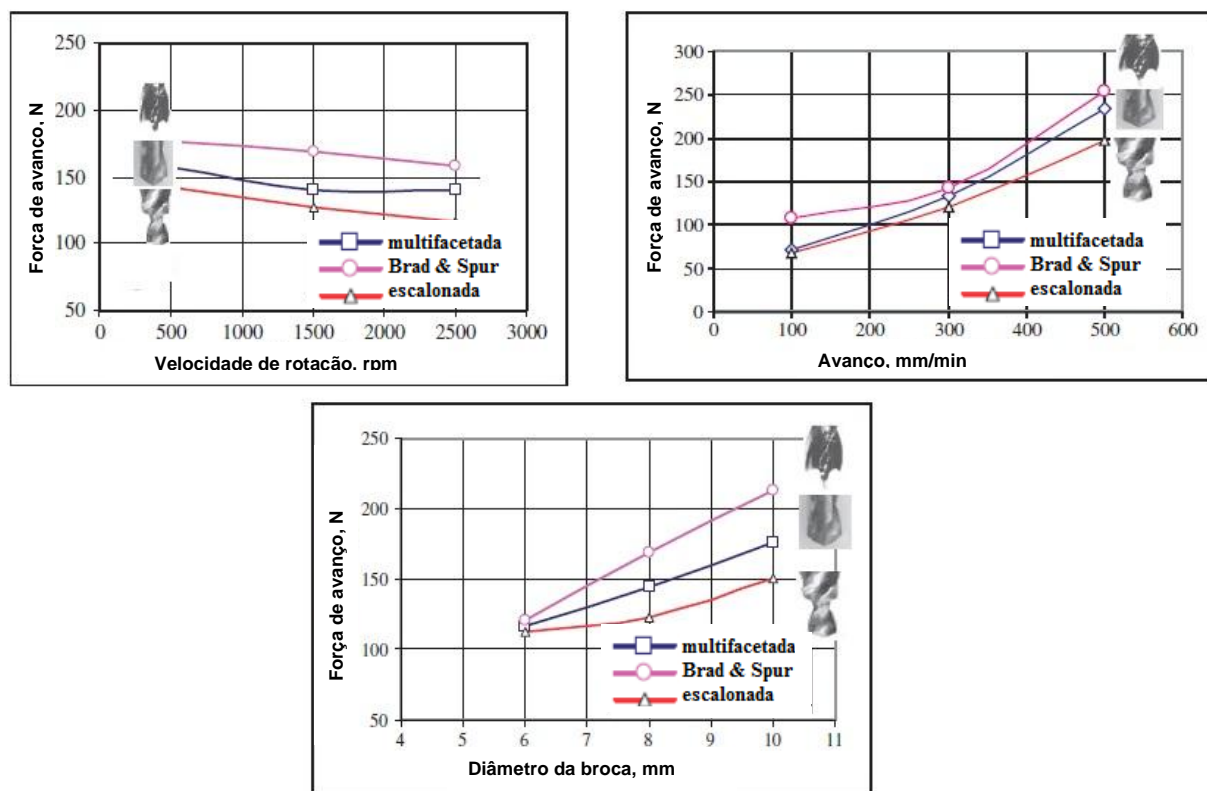


GRÁFICO 2.3 - Influência dos parâmetros de corte sobre a força de avanço (LATHA *et al.*, 2011).

2.9 Qualidade do furo em materiais compósitos e estruturais

Durante a furação de materiais compósitos e estruturais, uma característica importante a ser observada é o acabamento na parede do furo, já que seu processamento pode gerar alguns defeitos, como acontece em qualquer outro material. A FIG. 2.9 ilustra a furação de materiais compósitos e estruturais.

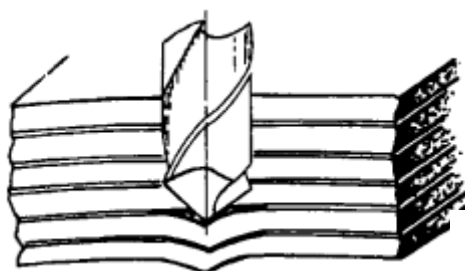


FIGURA 2.9 - Furação em materiais compósitos e estruturais (TSAO e HOCHENG, 2005).

De acordo com Lachaud *et al.* (2001), os defeitos causados pela operação de furação são danos à entrada do furo, defeitos de circularidade, danos causados pela temperatura na parede do furo e delaminação na saída do furo.

2.9.1 Delaminação

A delaminação é um dano observado durante a furação de materiais compósitos e estruturais, que consiste na separação de camadas adjacentes do laminado.

Segundo Durão *et al.* (2008), a delaminação induzida por furação ocorre tanto na entrada quanto na saída da ferramenta da peça. A FIG.2.10 ilustra o mecanismo de delaminação na entrada e na saída da furação.

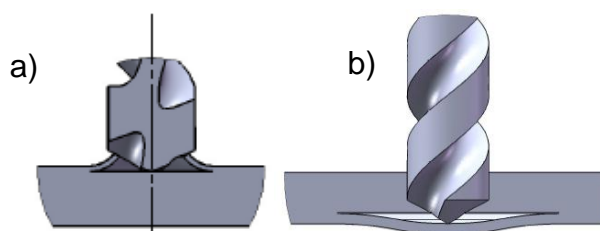


FIGURA 2.10 - Mecanismos de delaminação: a) entrada b) saída (DURÃO *et al.*, 2008).

O primeiro mecanismo (FIG. 2.10 a) é consequência do contato da extremidade da broca com as camadas superiores do laminado. Quando se inicia o corte, o material tende a ser puxado pela hélice da broca, num mecanismo semelhante a um “saca-rolha”. O uso de avanços moderados tende a diminuir, ou mesmo a anular, este efeito (DURÃO *et al.*, 2008).

A delaminação na saída do furo (FIG. 2.10 b) acontece porque o corpo da broca não penetrou totalmente no material. A pressão da broca pode causar tensão normal que, provavelmente, abre a interface da malha (RUBIO *et al.*, 2007).

Diversos estudos são feitos a fim de verificar a influência de geometria de brocas na delaminação em compósitos e materiais estruturais. Tsao e Hocheng (2005) estudaram a delaminação para a broca helicoidal, *Brad & Spur*, punhal e escalonada. O dano foi evidente na borda do furo para todas as brocas utilizadas. Verificou-se pouca influência de variações de velocidade sobre a delaminação. No entanto, valores de avanço altos produzem não só maior delaminação, mas também uma forma mais

irregular desta. Verificou-se que a broca helicoidal apresentou maior delaminação entre as brocas.

Khashaba (2012) considera importante o desenvolvimento de brocas com geometrias diferentes, com a finalidade de distribuir a força de corte para a periferia, em vez da operação de furação ser concentrada no centro do furo, eliminando, assim, a delaminação em materiais compósitos e estruturais. O autor também considera que a delaminação pode ser causada pelo aumento do avanço.

2.9.2 Rebarbas

As rebarbas são defeitos que também podem ocorrer na furação de painéis sanduíche. Elas consistem em projeção de material além do furo e podem ser encontradas na entrada e também na saída do furo.

As rebarbas formadas na superfície de entrada do furo passam por um processo de deformação plástica, enquanto a rebarba produzida na saída é parte do material que se estende para fora da superfície de saída da peça de trabalho. A maioria dos problemas relacionados com a rebarba na furação é causada pela rebarba de saída, porque ela é maior que a de entrada (KIM *et al.*, 2001).

Os custos e o tempo associados à remoção de rebarba durante o processo produtivo são consideráveis. Portanto, é necessário otimizar os parâmetros de corte, assim como a escolha adequada das ferramentas, de modo que as rebarbas sejam reduzidas.

Kim *et al.* (2001) relataram, em sua pesquisa, diferentes classificações quanto à forma das rebarbas. São elas: as rebarbas uniformes (rebarba uniforme alta ou baixa), a rebarba uniforme com formação de “cap” (boina ou quipá), rebarba coroa e rebarba de transição, conforme FIG 2.11.

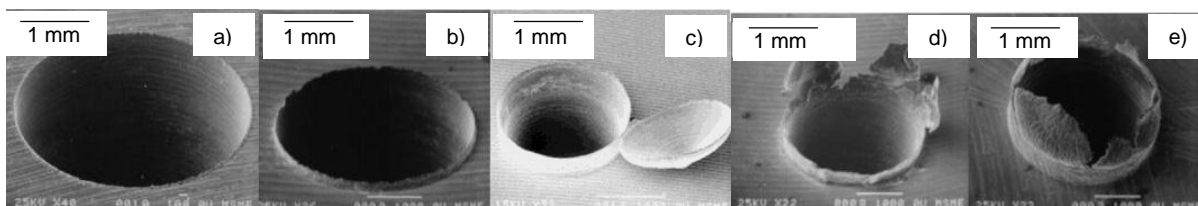


FIGURA 2.11 - Tipos de rebarba: a) rebarba uniforme baixa, b) rebarba uniforme alta, c) rebarba “cap”, d) rebarba de transição, e) rebarba coroa (KIM *et al.*, 2001).

A rebarba uniforme consiste em uma rebarba com um acabamento único em toda a superfície do furo. A rebarba do tipo coroa apresenta fragmentos elevados sobre o furo, enquanto a rebarba de transição combina as características das outras duas.

Durante a formação da rebarba uniforme, à medida que a broca se aproxima da superfície de saída, o material sob a aresta de corte começa a deformar-se, no sentido do centro para as arestas da broca. Quando a fratura inicial do material ocorre no final das arestas de corte, é criado um fenômeno que se denomina “cap” (semelhante a uma boina ou quipá), e a outra parte do material deformado é dobrada e empurrada.

Na formação da rebarba coroa, uma maior força aplicada gera deformação plástica precoce durante o processo, ocorrendo uma fratura inicialmente no centro, e, quando há desgaste na aresta de corte da broca, o material não é facilmente cortado, sendo apenas empurrado para frente.

A formação da rebarba de transição é semelhante à da rebarba uniforme. Ocorre uma fratura inicial perto do final das arestas de corte, mas o tempo de fratura do material é maior do que na rebarba uniforme. À medida que a broca avança no material, a tensão na aresta de corte ultrapassa a tensão de fratura, e a rebarba coroa é formada (KIM *et al.*, 2001).

A FIG. 2.12 representa esquematicamente o mecanismo de formação das rebarbas uniforme, uniforme com formação de “cap” e a rebarba coroa em um material sanduíche.

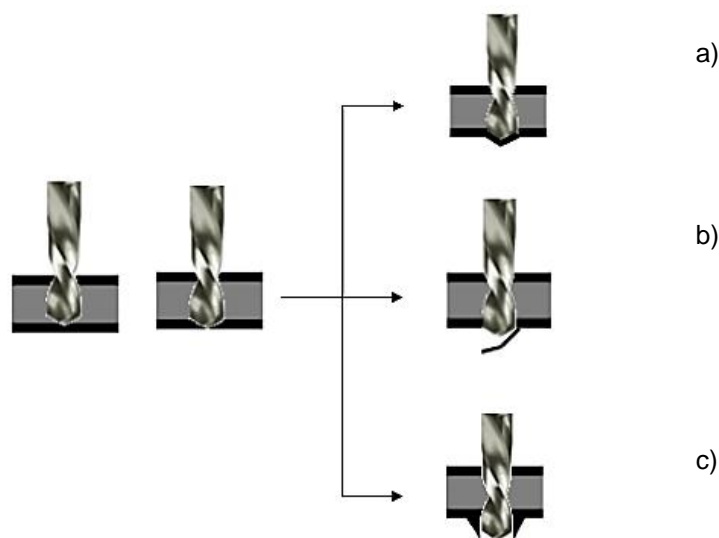


FIGURA 2.12 - Mecanismo de formação de rebarba: a) rebarba uniforme b) rebarba uniforme com formação de "cap" c) rebarba coroa.

Segundo Aurich *et al.* (2009), as rebarbas estão relacionadas a fatores de desgaste em ferramentas, o que pode levar à sua substituição. Se as rebarbas não forem removidas, podem causar lesões aos trabalhadores, ou elas podem se soltar durante o funcionamento de um produto, causando danos ao seu desempenho. Isto explica a necessidade de se estudar as rebarbas formadas na furação do painel sanduíche.

2.9.3 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 FIG 2.13.

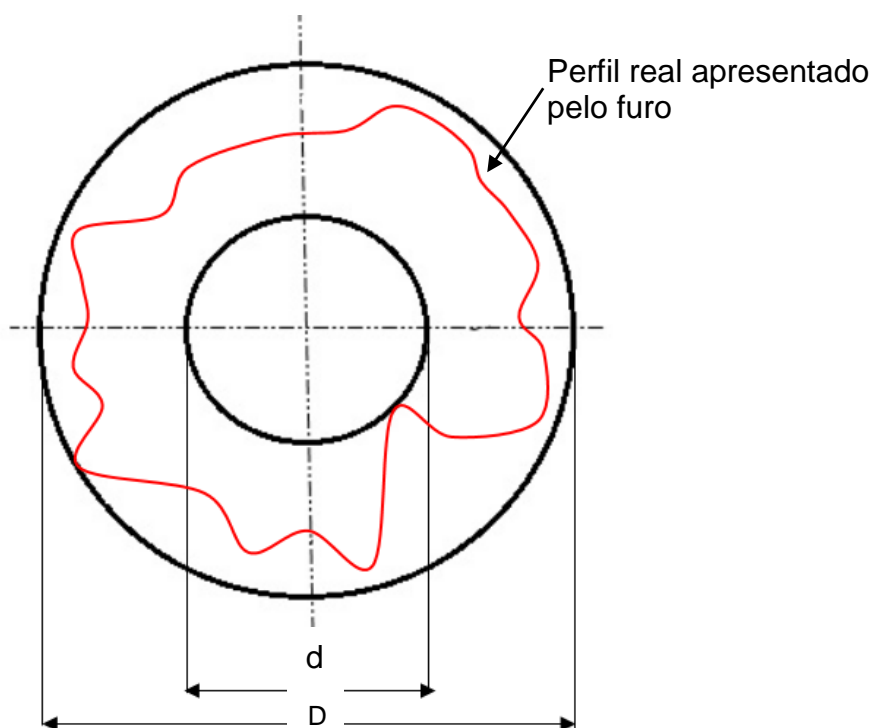


FIGURA 2.13 - Erro de circularidade.

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 PRFC/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 Tagushi foi aplicado para relacionar a circularidade ao sinal ruído (S/N), conforme GRA 2.4.

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.

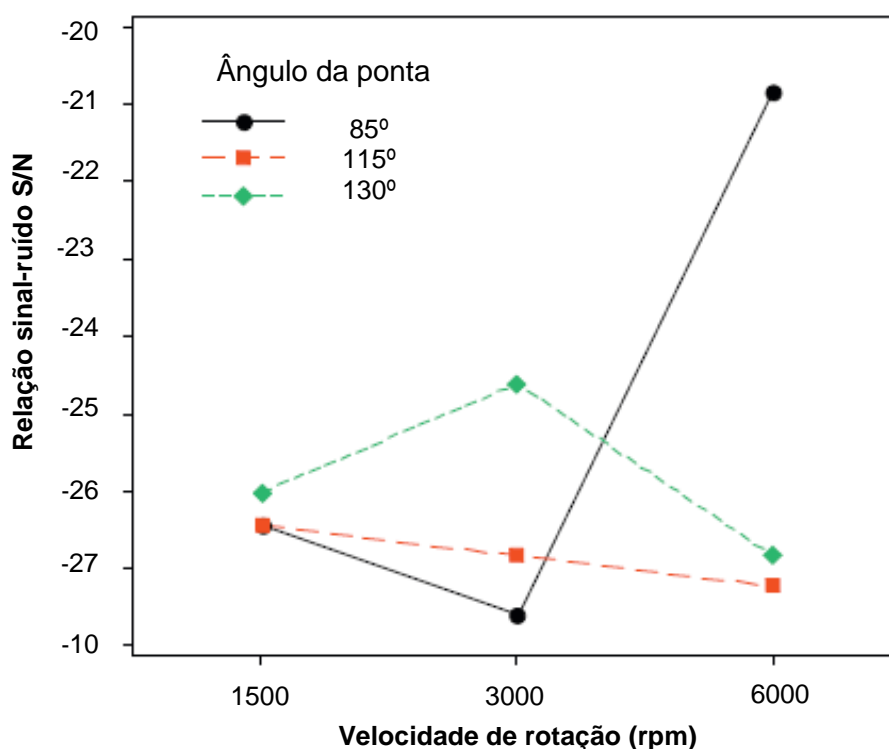


GRÁFICO 2.4 - Interação sinal-ruído obtida para o erro de circularidade (RUBIO *et al.*, 2013).

2.9.4 Defeitos causados pela temperatura

Estudos têm mostrado que a temperatura pode causar danos nos materiais compósitos e estruturais. Polímeros termoendurecíveis, tais como policarbonatos, polimetilmetacrilato (vidro acrílico), polieteretercetona e outros materiais semicristalinos termoplásticos, devem ser usinados dentro de uma faixa de

temperatura específica (temperatura de transição vítrea), para evitar danos na superfície, uma vez que a microestrutura dos materiais é significativamente afetada pela transferência de calor (REZENDE *et al.*, 2016).

Lizardo *et al.* (2015) destacam que a temperatura apresenta uma função importante na usinagem de materiais poliméricos, já que influencia diretamente na taxa de desgaste da ferramenta e no acabamento final da superfície do material da peça de trabalho.

Yang *et al.* (2015) avaliaram o comportamento de painéis sanduíche constituídos de carbono/epóxi laminados submetidos a baixas velocidades de impacto. Constataram que o tamanho do dano no recheio do material sanduíche aumentou com a elevação da temperatura, devido à redução do módulo de elasticidade no núcleo para as temperaturas elevadas.

Pilipchuk *et al.* (2013) também identificaram danos em material sanduíche, e justificaram que a característica dos danos está relacionada a diferentes cargas de flexão e temperaturas.

3. METODOLOGIA

Este capítulo apresenta os materiais e equipamentos utilizados nesta pesquisa, bem como a metodologia empregada para interpretação dos resultados gerados. Os testes de furação das placas de PEALL foram realizados no Laboratório de Usinagem e Automação do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da UFMG. Neste laboratório também foram feitas fotografias das brocas, avaliação da forma de cavacos, medição da rebarba do furo e da circularidade.

3.1 Polietileno-Alumínio Laminado (PEALL)

O corpo de prova utilizado consistiu em um painel sanduíche de duas chapas (superior e inferior) de ligas de alumínio (EN AW-AMg1-5005), com um núcleo de polietileno (PE) de baixa densidade ($0,92 \text{ g/cm}^3$), representado esquematicamente na FIG 3.1. Para os furos realizados, utilizaram-se três placas de dimensões 120 mm (altura) x 110 mm (largura) x 4 mm (espessura) cada, sendo que a espessura total compreendeu duas placas de alumínio com 0,5 mm, e polietileno com 3 mm.

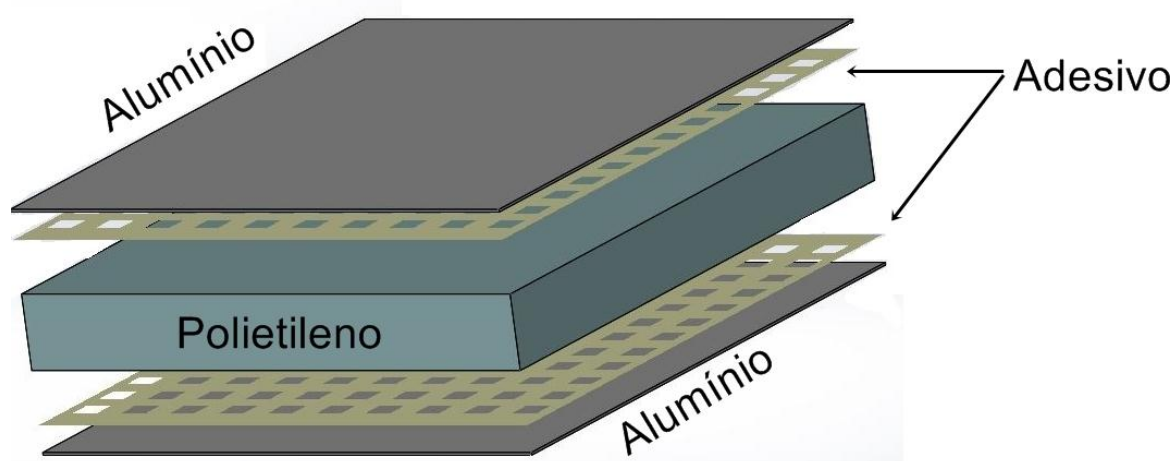


FIGURA 3.1 - PEALL.

Segundo especificações do fabricante, o alumínio e o polietileno foram unidos por meio de um processo termoquímico e mecânico, utilizando-se adesivos entre a matriz e o reforço. A liga de alumínio EN AW-AMg1-5005 foi empregada por permitir a confecção de filmes planos, chapas e laminados.

As TAB. 3.1 e 3.2 apresentam a composição química da liga de alumínio e as propriedades mecânicas do PE (polietileno de baixa densidade), respectivamente. A TAB 3.3 mostra as principais propriedades mecânicas do PEALL.

TABELA 3.1 - Composição química da liga de alumínio EN AW-AMg1-5005 (DIN EN 573-3, 2009).

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
0,30	0,70	0,20	0,20	0,50-1,10	0,10	-	0,25

TABELA 3.2 – Faixa de propriedades físicas do polietileno (COUTINHO *et al.*, 2003).

Densidade, g/cm ³	0,912 – 0,925
Temperatura de fusão cristalina, °C	102 – 112
Índice de refração, n _D	1,51 – 1,52
Tração no escoamento, MPa	6,2 – 11,5
Alongamento no escoamento (%)	100 – 800
Resistência à tração, MPa	6,9 – 16
Alongamento máximo, %	100 – 800
Módulo elástico, MPa	102 – 240
Dureza, Shore D	40 – 50

TABELA 3.3 - Propriedades mecânicas do PEALL (REZENDE, 2016).

Material	Módulo de elasticidade	Resistência à tração	Alongamento (%)
PEALL	6,51 ± 1,20	30,31 ± 1,78	4 ± 1,4

A norma ABNT NBR 15446 (2013) estipula espessuras e características para esse tipo de painel. Nos painéis compostos, as chapas de alumínio devem ter espessura mínima de 0,3 mm para aplicação interna e 0,5 mm para utilização externa. O acabamento superficial pode ser pintado ou anodizado, apresentar cor uniforme na face aparente ou receber pintura contínua tipo “*coil coating*”, uma tinta líquida que pode ser à base de PVDF (fluoreto de polivinilideno), fluoropolímero duroplástico ou poliéster, aplicado em uma ou ambas as faces.

Este tipo de pintura garante alta durabilidade e uniformidade da cor e adiciona ao produto qualidade, versatilidade, leveza, liberdade de formas, praticidade de limpeza e conservação. O material tem sido aplicado em revestimentos de fachadas, marquises, testeiras, fachadas contínuas em composição com vidros, indústria aeronáutica e automobilística.

3.2 Ferramentas de corte

Utilizaram-se três brocas de metal duro, cuja descrição é apresentada na TAB.3.4. Suas diferentes características geométricas são mostradas na FIG. 3.2.

TABELA 3.4 - Descrição técnica das brocas utilizadas nos ensaios de furação.

Broca	Descrição
<i>Brad & Spur</i>	Broca de metal duro, marca GUHRING, classe K10, diâmetro de 5 mm, comprimento de 57 mm, haste cilíndrica, oxidada a vapor e duas arestas de corte.
helicoidal com duas arestas	Broca de metal duro, marca TITEX PLUS, classe K30F, diâmetro de 5 mm, comprimento de 62 mm, haste cilíndrica, sem revestimento, ângulo de ponta de 118°, helicoidal com duas arestas de corte.
helicoidal com três arestas	Broca de metal duro, marca TITEX PLUS, classe K30F, diâmetro de 5mm, comprimento de 62 mm, haste cilíndrica, sem revestimento, ângulo de ponta 150°, helicoidal com três arestas de corte.

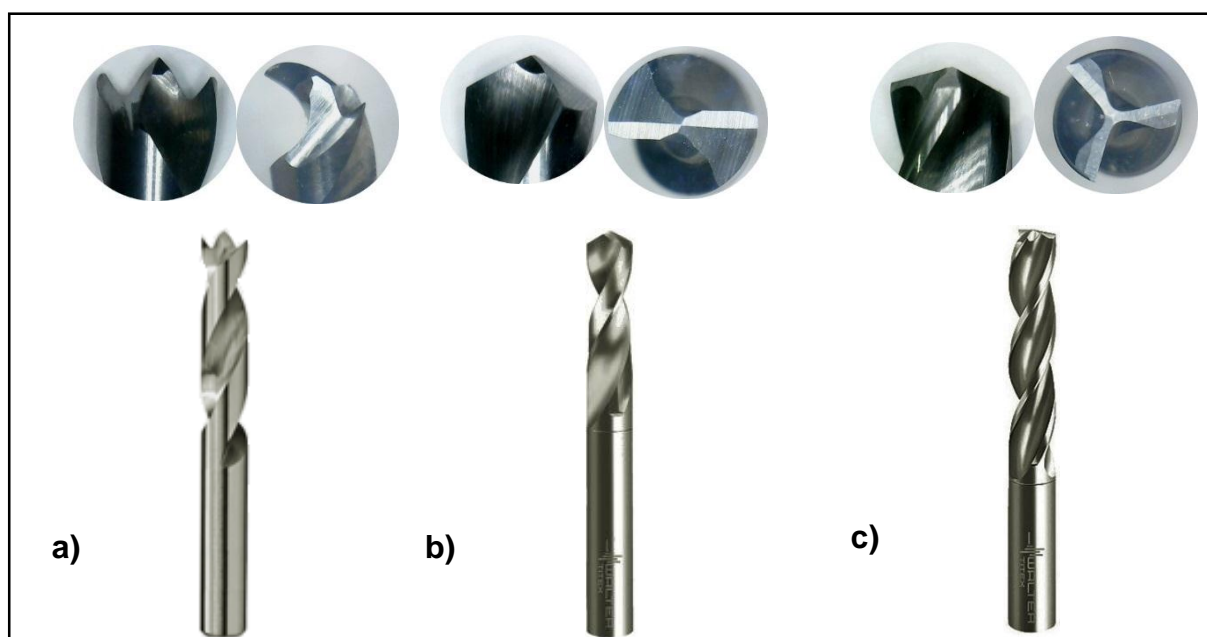


FIGURA 3.2 - Brocas utilizadas para furação: a) *Brad & Spur* b) helicoidal com duas arestas c) helicoidal com três arestas.

3.3 Centro de usinagem e sistema de aquisição de dados

Os testes de furação foram realizados no centro de usinagem ROMI, modelo Discovery 560, equipado com comando numérico computadorizado SIEMENS 810D, com potência máxima de 9kW e rotação máxima de 7500 rpm. A FIG. 3.3 apresenta a configuração do sistema de aquisição de dados, composto por um

dinamômetro extensométrico, amplificador de sinal, placa de aquisição de dados e computador com o software Labview. A FIG 3.4 mostra uma ampliação do dinamômetro extensométrico.

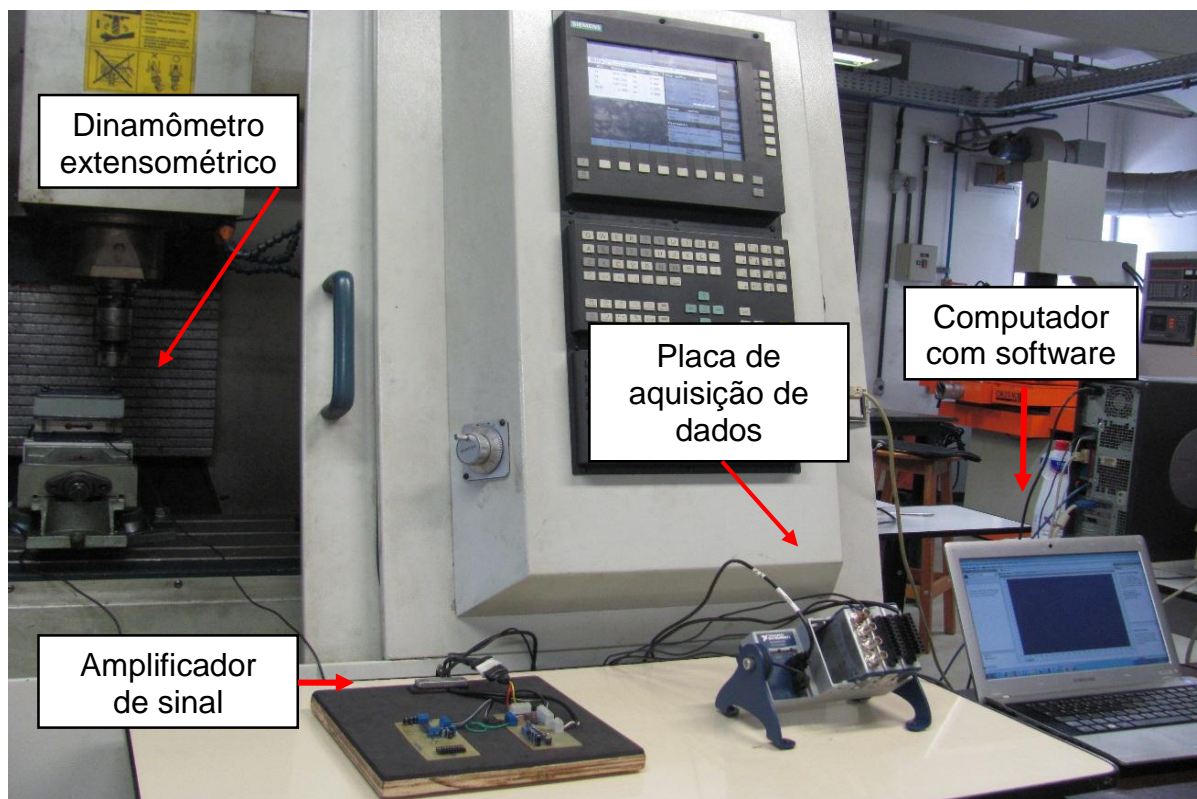


FIGURA 3.3 - Configuração do experimento.

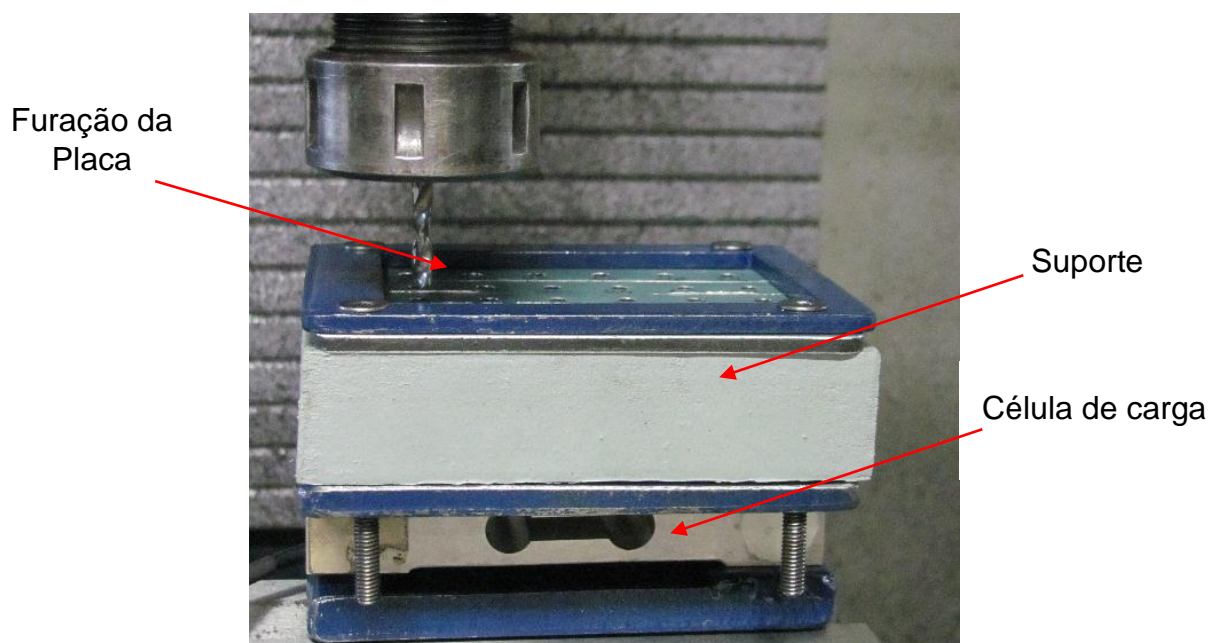


FIGURA 3.4 - Dinamômetro extensométrico.

A célula de carga utilizada possui resolução de 0,01 N, e faixa de operação de 0 a 20 KgF. É constituída por extensômetros, que sofrem uma deformação quando se aplica uma força sobre ela, fazendo com que ocorra uma diferença de potencial nos terminais de saída da célula de carga. Após aplicada a força, os extensômetros convertem a deformação elástica em variação de resistência elétrica, formando uma ponte de Wheatstone. Esta ponte é uma montagem que serve para encontrar o valor, com boa precisão, de uma resistência elétrica desconhecida.

Utilizou-se um amplificador (LM 358) de -12v e +12v para amplificar o sinal 100 vezes, ou seja, aumentar a potência do sinal para que a placa de aquisição da National Instruments convertesse-o em um valor digital e o enviasse para o software LabVIEW. O esquema de funcionamento é mostrado na FIG. 3.5.

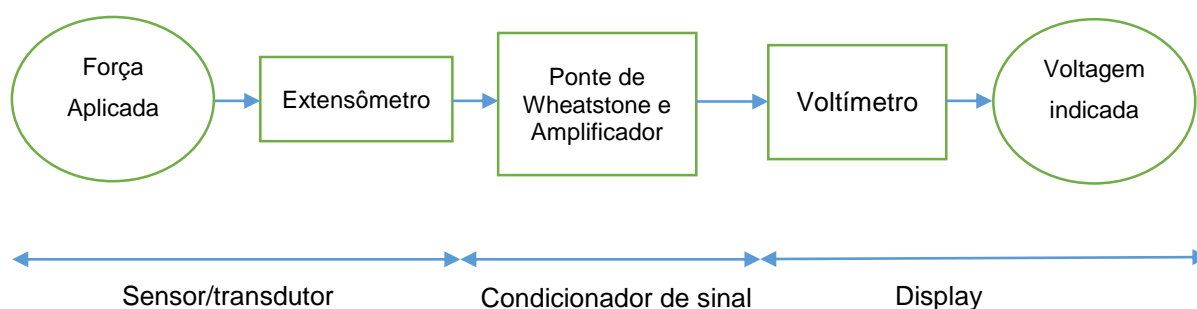


FIGURA 3.5 - Esquema de funcionamento do sistema de aquisição de dados.

3.3.1 Calibração do sistema de aquisição de dados

Para calibrar o sistema, utilizaram-se cargas conhecidas, e, para cada uma delas, encontrou-se o valor da diferença de potencial. Os valores utilizados para a calibração encontram-se no Apêndice A. Considerou-se o valor de 9,81 m/s² para a aceleração da gravidade. A EQUAÇÃO (3.1) foi utilizada para encontrar a força de avanço referente a cada teste, de acordo com a diferença de potencial indicada pelo software LabVIEW.

$$F_f = 19,69 V + 2,56 \quad (3.1)$$

Onde:

F_f = força de avanço (N), V = diferença de potencial (V)

3.4 Sistema de medição de rebarbas

Para a medição da altura das rebarbas na saída do furo, foi utilizado o microscópio Askania, modelo GSZ 2T, com micrômetro acoplado (resolução de 0,01 mm) (FIG. 3.6).



FIGURA 3.6 - Microscópio Askania, modelo GSZ 2T.

Para cada furo, posicionou-se a linha do microscópio no início e no fim da rebarba (considerando-se a maior altura), para que pudesse ser feita a subtração e encontrar o valor desejado. A FIG 3.7 representa esquematicamente a medição da altura da rebarba.

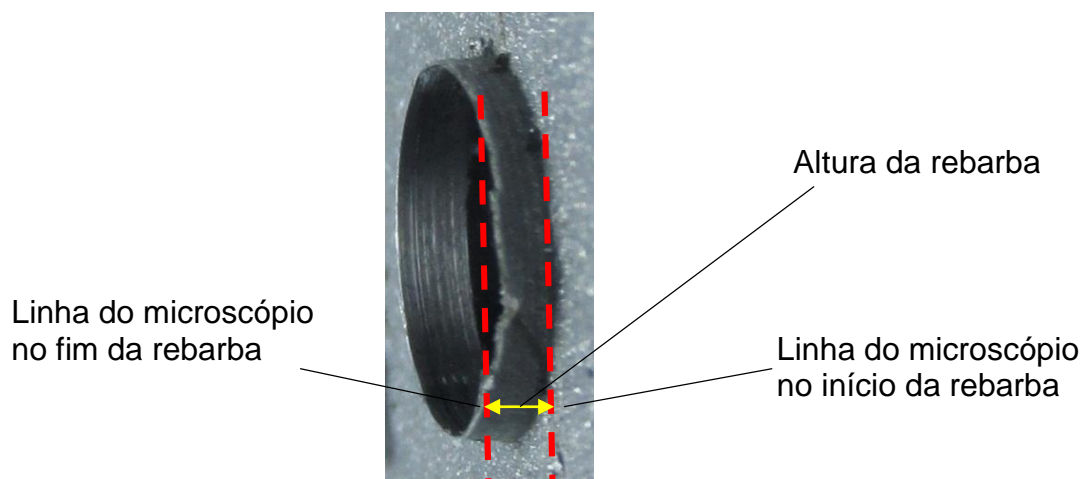


FIGURA 3.7 - Representação esquemática da medição da altura da rebarba.

3.5 Sistema de medição de circularidade

Para medir a circularidade dos furos, utilizou-se a máquina de medição por coordenadas TESA, modelo MICRO HITE 3D (FIG. 3.8), equipada com *software* REFLEX SCAN (versão 1.2) com resolução de 0,01 μm .



FIGURA 3.8 - 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 furo, ou seja, a 2 mm da superfície do material.

3.6 Planejamentos dos experimentos

Empregou-se um planejamento fatorial completo, que permitiu o estudo de vários fatores em dois ou mais níveis, 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 TAB. 3.5.

Nas duas repetições completas do experimento, todas as combinações possíveis dos níveis dos fatores foram estudadas. 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.

TABELA 3.5 - Parâmetros do experimento.

Símbolo	Fatores	Níveis			
		1	2	3	4
A	Ferramenta	<i>Brad & Spur</i>	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

3.7 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, os fatores ferramenta, velocidade de corte e avanço influenciaram na qualidade da operação de furação, ou seja, nas variáveis de resposta: força de avanço, altura da rebarba e circularidade.

A TAB. 3.6 representa a saída para a análise de variância para um experimento de um fator.

TABELA 3.6 - Análise de variância para um experimento de um fator Montgomery (2009).

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Média Quadrática	F
Tratamentos	$a-1$	$SQ_{\text{Tratamentos}}$	$MQ_{\text{Tratamentos}}$	$\frac{MQ_{\text{Tratamentos}}}{MQ_E}$
Erro	$a(m-1)$	SQ_E	MQ_E	
Total	$am-1$	SQ_T		

Onde:

$SQ_{\text{tratamentos}}$ = Soma dos quadrados dos tratamentos

SQ_E = Soma dos quadrados dos erros

SQ_T = Soma de quadrados total

$MQ_{\text{tratamentos}}$ = Média quadrática dos tratamentos

MQ_E = Média quadrática dos erros

Nas análises de variância apresentadas neste trabalho, os dados são apresentados de acordo com a TAB 3.6, com adição do valor p e do fator de contribuição. A ANOVA foi feita com um nível de confiança de 95% e, para que existisse contribuição dos fatores individuais para a resposta encontrada (força de

avanço, altura da rebarba e 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 EQ. 3.2 (OKASHA, 2011).

$$\text{Contribuição (\%)} = \frac{SQ \text{ tratamentos}}{SQ_T} \quad (3.2)$$

3.7.1 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 EQ. 3.3:

$$e_{ij} = x_{ij} - \bar{x}_i \quad (3.3)$$

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 TAB 3.7.

TABELA 3.7 - Gráficos para análise de resíduos (WERKEMA *et al.*, 1996).

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

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}_l . Se a faixa de dispersão no gráfico de resíduos contra as médias dos tratamentos depender do valor de \bar{x}_l , 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.

3.8 Análise de regressão linear múltipla

Uma análise de regressão gera uma equação para descrever a relação estatística entre um ou mais preditores e a variável de resposta para prever novas observações. A regressão linear geralmente usa o método de estimativa de mínimos quadrados comuns, que resulta na equação minimizando a soma dos resíduos quadrados. Modelos com um preditor são conhecidos como regressão simples (SUPORTE MINITAB, 2016).

Por outro lado, de acordo com Montgomery (2004), alguns problemas de regressão envolvem mais de uma variável independente. Neste caso, pelo menos três variáveis independentes são necessárias. O modelo geral é chamado de análise de regressão linear múltipla e é dado pela EQ. 3.4.

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \dots + \beta_kx_k + E \quad (3.4)$$

Onde:

y = variável de resposta

$\{\beta_i\}$ = coeficientes de regressão

E = constante associada à equação

Na presente pesquisa, buscou-se estabelecer a relação entre a variável de resposta força de avanço, enquanto os preditores foram a velocidade de corte e o avanço. Buscaram-se equações que demonstrassem matematicamente o comportamento da força de avanço com os parâmetros de corte para cada broca.

Os resultados de uma regressão identificam a direção, o tamanho e a significância estatística da relação entre um preditor e a resposta. De acordo com Suporte Minitab (2016), consideram-se os seguintes aspectos para interpretação:

- O sinal de cada coeficiente indica a direção da relação;
- Os coeficientes representam a mudança média na resposta para uma unidade de mudança no preditor, mantendo os outros preditores no modelo constantes;
- O valor p para cada coeficiente testa a hipótese nula de que o coeficiente é igual a zero (sem efeito). Portanto, valores p baixos indicam que o preditor é uma adição significativa ao modelo;
- A equação prediz novas observações com valores especificados nos preditores.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, são apresentados e discutidos os principais resultados da pesquisa. Foram avaliados estatisticamente os dados de força de avanço, altura da rebarba e circularidade por meio de análise de variância, gráficos de interação, gráficos de resíduos e análise de regressão linear múltipla. Realizaram-se as análises estatísticas no *software* Minitab® versão 17.

As análises qualitativas das rebarbas e cavacos gerados também são apresentadas, com o objetivo de avaliar os resultados por meio de diferentes parâmetros de usinagem.

As TAB. B.1, B.2 e B.3 do Apêndice B indicam os resultados para as medições da força de avanço (F_f), altura da rebarba e circularidade, respectivamente.

4.1 Força de avanço

Esta seção divide-se em três subseções, na subseção 4.1.1 é feita uma interpretação do perfil gráfico apresentado pela força de avanço ao longo da furação do PEALL, discutindo os diferentes desempenhos para cada broca utilizada no experimento. Na subseção 4.1.2, apresenta-se a análise de variância para a força de avanço, a fim de identificar as principais fontes de variação que afetam o comportamento da força de avanço. Por fim, na subseção 4.1.3, são expostas as equações de regressão linear múltiplas para cada broca, para elaborar um modelo de resposta para a força de avanço, considerando-se os fatores de influência velocidade de corte e avanço.

4.1.1 Comportamento gráfico da força de avanço

Inicialmente, fez-se uma análise do perfil apresentado pela força de avanço para as brocas helicoidal com duas arestas, helicoidal com três arestas e *Brad & Spur*. Para fins de comparação, os gráficos apresentam o perfil da força de avanço sob as seguintes condições: velocidade de corte 24 m/min e avanço 0,05 mm/rev.

O perfil de força de avanço apresentado pela broca *Brad & Spur* é mostrado no GRA 4.1

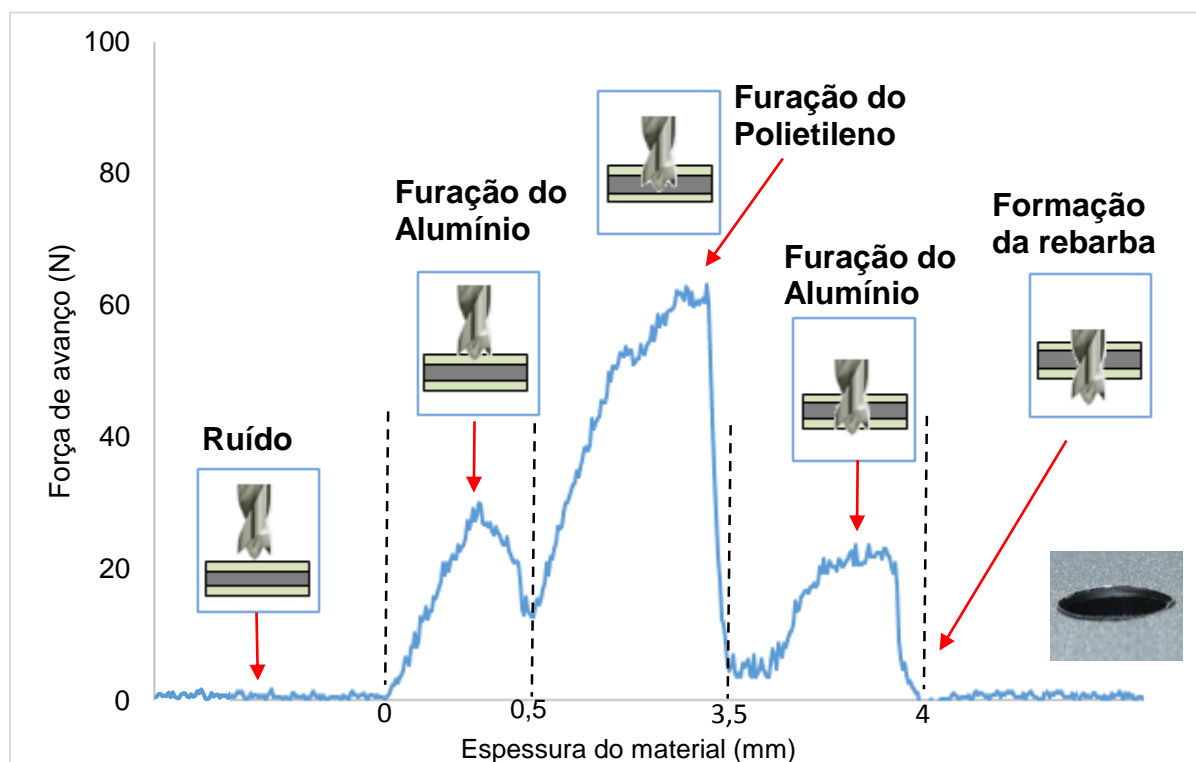


GRÁFICO 4.1 - Perfil da força de avanço para a broca Brad & Spur.

O GRA 4.1 revela os sinais de ruído antes da operação de furação, advindos de fatores externos. Em um momento inicial, somente o ponto central da broca entrou em contato com o material, recalcando-o em vez de cisalhar, o que gerou um esforço de corte. Com a redução do diâmetro no centro da broca, a velocidade de corte tendeu a zero, por isso o ponto central da broca apenas empurrou o material. Em seguida, as duas arestas de corte laterais da broca entraram em contato com o material, cortando-o, enquanto o ponto central da broca continuou empurrando o material - momento em que o esforço de corte foi maior em todo o processo, com uma força de avanço máxima de 70,53 N. Posteriormente, o ponto central da broca já se encontrava fora do material e apenas as arestas de corte laterais estavam cortando, logo os esforços de corte diminuíram. No momento de formação da rebarba, os esforços foram os menores, pois, quando o diâmetro atravessou a segunda placa de alumínio, as duas arestas de corte laterais e ponto central da broca já se encontravam fora do material, e não existia material a ser cortado nesta região.

O GRA. 4.2 apresenta o perfil da força de avanço na furação do PEALL para a broca helicoidal com duas arestas.

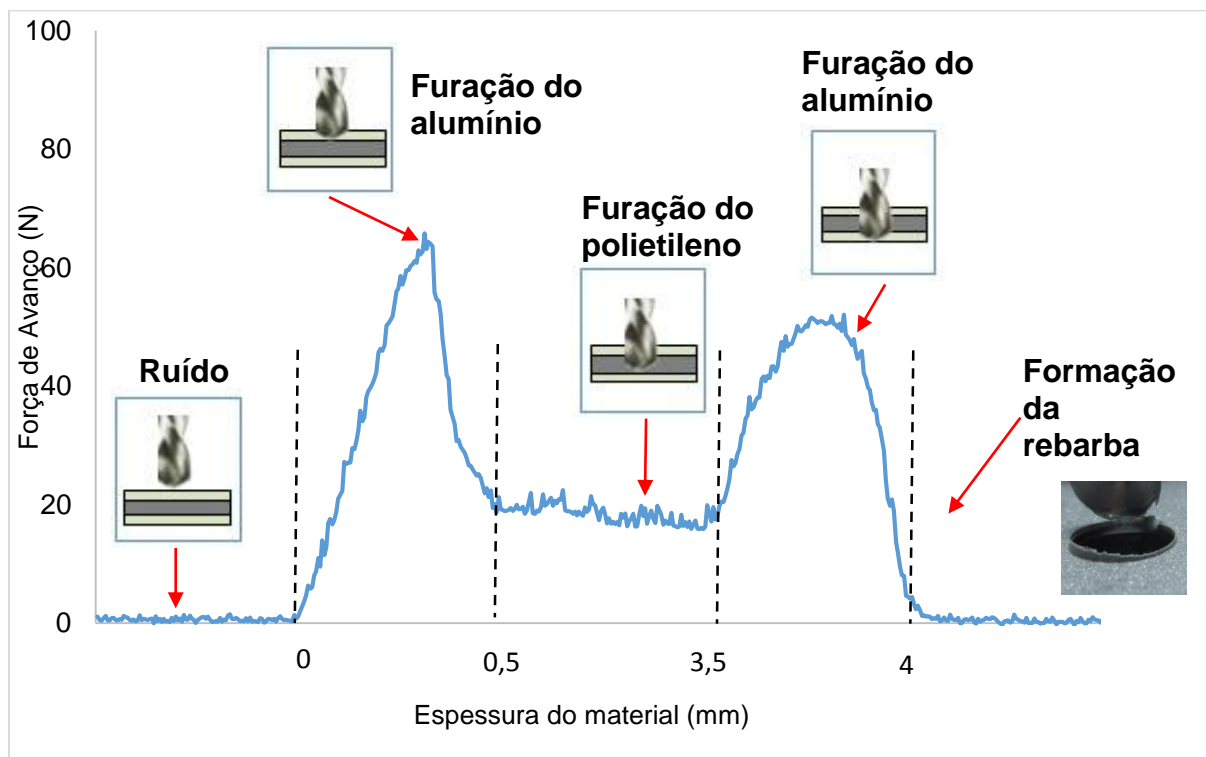


GRÁFICO 4.2 -Perfil da força de avanço para a broca helicoidal com duas arestas.

Os resultados obtidos para a broca helicoidal com duas arestas coincidiram com os obtidos por Rezende (2016) na furação do mesmo material sanduíche com brocas helicoidais. A explicação para esse fenômeno é que, inicialmente, a máquina apresentou sinais de ruído, devido a variações eletromagnéticas, vibrações mecânicas, entre outras influências inerentes ao ambiente experimental. Posteriormente, a broca furou a primeira placa de alumínio, obtendo a maior força de avanço (75,52 N) pois, como esta placa apresentava uma espessura de 0,5 mm, e a distância entre o plano que continha a aresta transversal de corte e a extremidade da aresta de corte era de 1,16 mm e quando o diâmetro todo da broca a atravessou, a sua ponta já se encontrava no polietileno. O material polimérico apresentou menores esforços de corte, devido à menor resistência,

Por fim, ocorreu a furação da segunda placa de alumínio e a força de avanço foi menor que na primeira, já que, quando a broca atravessou a segunda placa de alumínio, a sua ponta já estava fora do material, e não existia material a ser cortado nesta região. Depois, houve a formação da rebarba na saída do furo, devido à deformação plástica do material.

O perfil da força de avanço apresentado pela broca helicoidal com três arestas é apresentado no GRA 4.3.

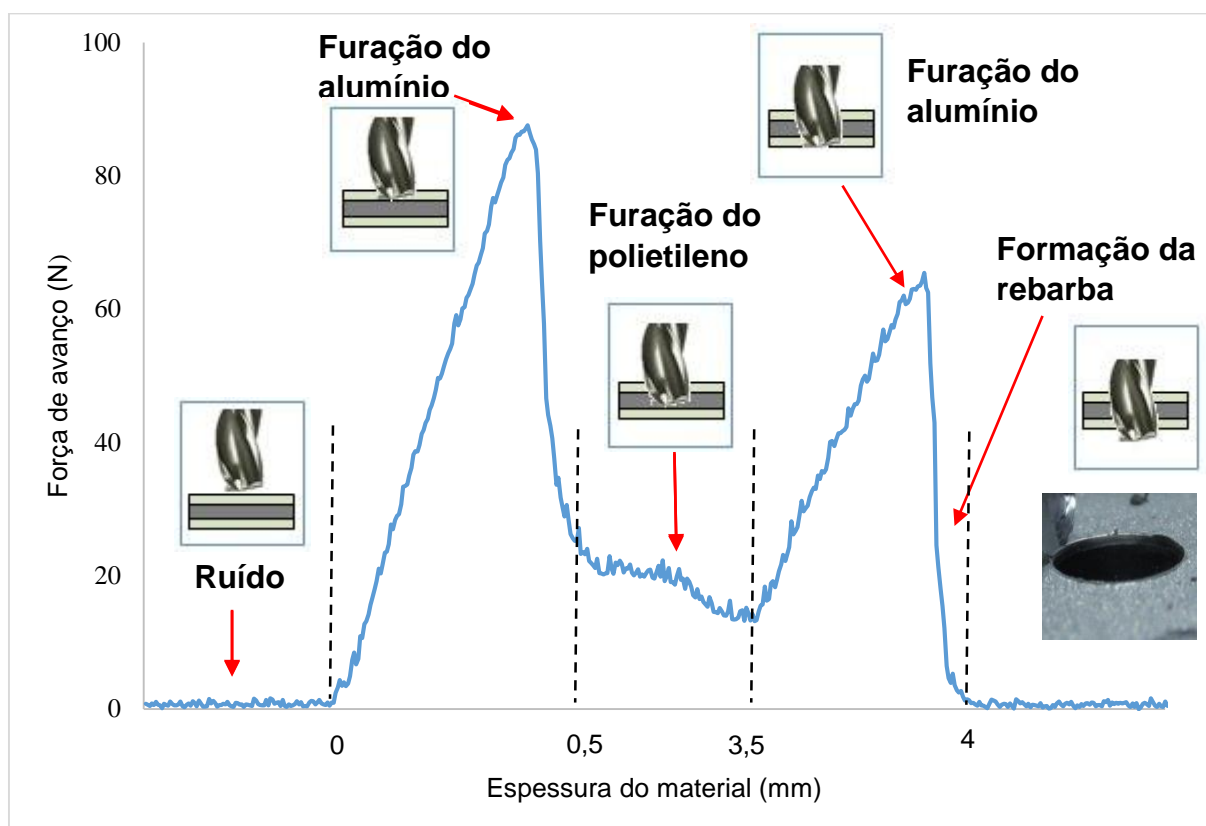


GRÁFICO 4.3 - Perfil da força de avanço para a broca helicoidal com três arestas.

Observou-se que o comportamento da broca helicoidal com três arestas foi semelhante ao apresentado pela broca helicoidal com duas arestas. Por meio dos GRA 4.2 e GRA 4.3, observou-se que nas duas brocas a força de avanço atingiu maior patamar quando cortou a primeira placa de alumínio, até atingir um ponto máximo. Em seguida, ocorreu uma diminuição súbita, quando o material polimérico foi perfurado devido à sua menor resistência. Por fim, a força de avanço aumentou novamente quando se perfurou a segunda placa de alumínio; no entanto, com valor menor que na primeira placa de alumínio devido à ausência de apoio.

A broca helicoidal com três arestas apresentou força de avanço máxima de 87,58 N, valor superior quando comparado com as outras duas brocas. A força de avanço para a broca helicoidal com três arestas foi maior do que a da helicoidal com duas arestas, porque seu ângulo de ponta foi de 150° , enquanto o ângulo de ponta da broca helicoidal com duas arestas foi de 118° , além de um maior número de arestas ter cortado o material.

Em uma comparação entre as brocas helicoidal com três arestas e a *Brad & Spur*, o ponto central da *Brad & Spur* apenas empurrou o material, sem cortá-lo; já na helicoidal com três arestas, haviam três arestas de corte realizando o corte efetivo do material.

4.1.2 Análise de variância para a força de avanço

A TAB. 4.1 apresenta a análise de variância para a força de avanço. Os dados foram disponibilizados com base na TAB 3.6, apresentada da seção 3.7 deste trabalho.

TABELA 4.1 - Análise de variância para a força de avanço.

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Média Quadrática	Valor F	Valor p	Contribuição
Ferramenta	2	83691,0	41845,5	211,68	<u>0,000</u>	76,2%
Vc	2	8406,0	4203,0	21,26	<u>0,000</u>	7,6%
f	3	3268,8	1089,6	5,51	<u>0,003</u>	2,9%
Ferramenta * Vc	4	758,0	189,5	0,96	0,442	
Ferramenta * f	6	1826,7	304,4	1,54	0,193	
Vc * f	6	3057,2	509,5	2,58	<u>0,035</u>	2,7%
Ferramenta * Vc * f	12	1632,2	136,0	0,69	0,752	
Erro	36	7116,5	197,7			
Total	71	109756,4				
Resumo do modelo						
Desvio-Padrão	R-sq	R-sq (adj)				
14,0599	93,52%	87,21%				

Para que a ANOVA seja interpretada, é necessário que os dados para a força de avanço sigam uma distribuição normal. Conforme apresentado no GRA 4.4, o gráfico de probabilidade normal apresenta os resíduos próximos a uma reta na região central. O gráfico de resíduos versus valor ajustado demonstra que os dados ficaram dispersos em torno da média, não dependendo dela e não seguindo nenhuma tendência específica. O gráfico resíduos versus tempo indica que os resíduos foram independentes no tempo e não apresentaram sequências de crescimento ou

decréscimo consecutivos. Desta forma, a análise de resíduos apresentada no GRA 4.4 indica a normalidade dos dados para a força de avanço, sendo validada a ANOVA.

De acordo com a TAB 4.1, os efeitos principais (ferramenta, velocidade de corte e avanço) e a interação de segunda ordem ($V_c * f$) apresentaram influência sobre a força de avanço. O parâmetro mais influente sobre esta foi a geometria da ferramenta de corte utilizada.

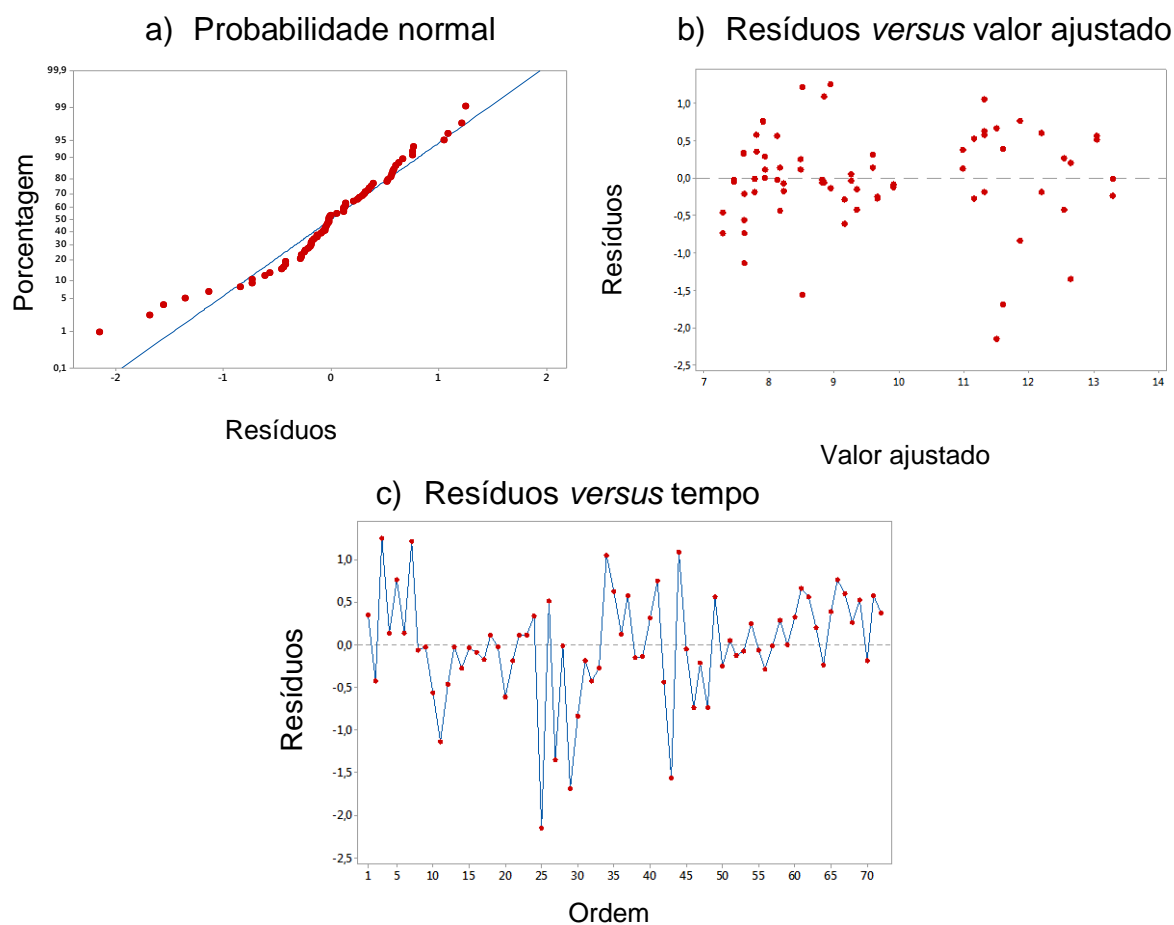


GRÁFICO 4.4 - Análise de resíduos para a força de avanço: a) Probabilidade normal b) resíduos *versus* valor ajustado c) resíduos *versus* tempo.

No GRA. 4.5 apresenta-se a interação para a força de avanço com os fatores significativos (efeitos principais) identificados na ANOVA. Pode ser observado, no gráfico, que a força de avanço tendeu a diminuir com o aumento da velocidade de corte, enquanto o aumento do avanço (considerando seus valores mínimo e máximo) levou ao aumento da força de avanço.

Com relação à influência da velocidade de corte sobre a força de avanço, a tendência encontrada pode ser explicada devido a um aquecimento da peça de

trabalho quando submetida a velocidades de corte maiores, o que aumentou sua ductilidade e diminuiu sua resistência. Resultados similares foram encontrados por Latha *et al.* (2011), que analisaram a força de avanço durante a furação de PRFV.

De acordo com Machado *et al.* (2015), a força de avanço é a projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção do avanço, dada pela velocidade de avanço. Dessa forma, existe uma relação direta entre avanço e força de avanço, o que de fato ocorreu na maioria das situações. Além disso, para avanços maiores são necessários maiores esforços, uma vez que é retirada maior quantidade de material por volta. Os estudos de Srinivasan *et al.* (2014) e Durão *et al.* (2010) chegaram à mesma conclusão.

As menores forças de avanço encontradas foram para a broca *Brad & Spur*. Isto aconteceu porque a broca foi projetada especialmente para a furação de materiais compósitos e estruturais. Assim, sua geometria faz com que um ponto central da broca entre primeiro em contato com a peça de trabalho, enquanto as arestas de corte laterais cisalham o material.

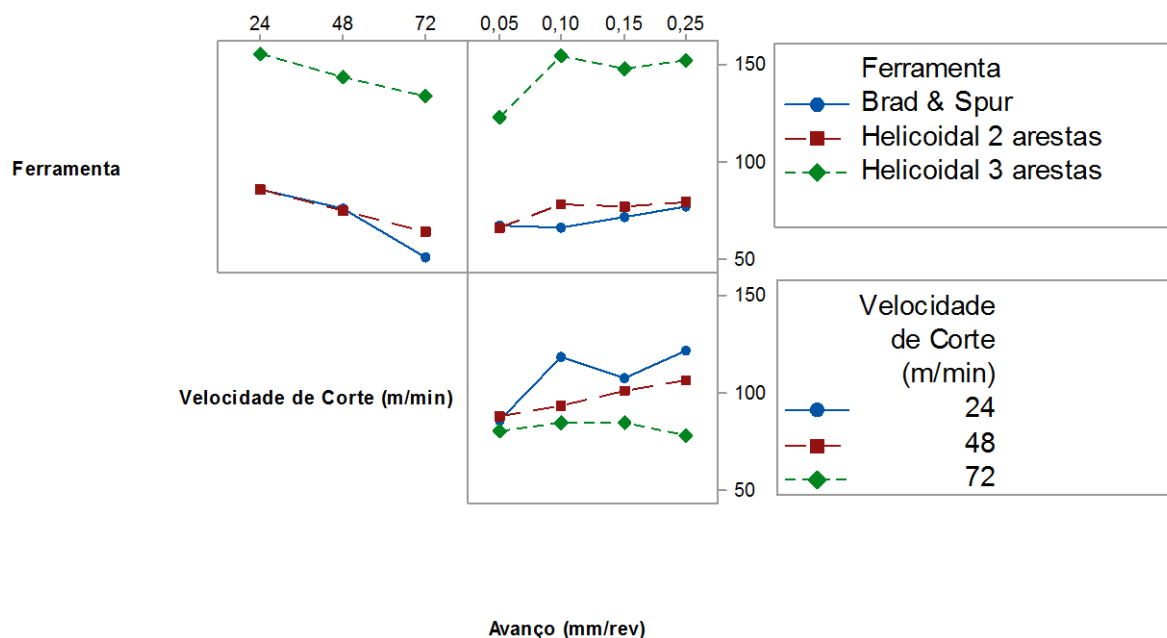


GRÁFICO 4.5 - Interação para a força de avanço.

4.1.3 Análise de regressão linear múltipla para a força de avanço

A partir dos resultados gerados para a força de avanço, buscou-se estabelecer uma equação para cada broca relacionando a força de avanço com a velocidade de corte e o avanço. Esta análise é importante pois permite prever o comportamento das brocas quando submetidas a diferentes parâmetros de corte.

Testes foram realizados no Minitab®, Versão 17, a fim de encontrar uma equação com melhores respostas. De acordo com a TAB 4.1, da ANOVA para a força de avanço, os parâmetros mais significativos de influência para a força de avanço foram V_c , f , e a interação $V_c \times f$. Assim, o primeiro passo foi elaborar a equação de regressão para a força de avanço com estes três fatores. Porém, as equações geradas não obtiveram uma boa correlação.

Montgomery (2004) destaca que o modelo da Equação 4.1 é um modelo de regressão linear válido e inclui o polinômio de segundo grau em duas variáveis.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{12} x_1 x_2 \quad (4.1)$$

Onde:

y = variável de resposta

$\{\beta_i\}$ = coeficientes de regressão

$\{x_i\}$ = variáveis associadas

Com base na Eq. 4.1, verificou-se que, ao elevar ao quadrado as variáveis velocidade de corte e avanço, bem como considerar a multiplicação $V_c f$, as equações foram significativas. Portanto, o modelo mais adequado para a força de avanço (F_f) considerou que esta depende dos seguintes fatores: velocidade de corte (V_c), avanço (f), velocidade de corte x velocidade de corte (V_c^2), avanço x avanço (f^2), velocidade de corte x avanço ($V_c f$), de acordo com a EQ. 4.2.

$$F_f = \beta_0 + \beta_1 v_c + \beta_2 f_2 + \beta_{11} v_c^2 + \beta_{22} f^2 + \beta_{12} v_c f \quad (4.2)$$

Dessa forma, para cada broca, encontrou-se a equação baseada na Equação 4.2. As equações de regressão encontradas são apresentadas nas EQ. 4.3, 4.4 e 4.5.

Brad & Spur

$$F_f = 19,8 + 2,02 v_c + 460 f - 0,024 v_c^2 - 677f^2 - 3,6 v_c f \quad (4.3)$$

Helicoidal com duas arestas

$$F_f = 73,6 - 0,357 v_c + 282 f - 0,00135 v_c^2 - 474f^2 - 1,8 v_c f \quad (4.4)$$

Helicoidal com três arestas

$$F_f = 127 + 0,8 v_c + 421f - 0,0135 v_c^2 - 977f^2 - 1,58 v_c f \quad (4.5)$$

Nas TAB 4.2, 4.3 e 4.4, apresentam-se as informações matemáticas relacionadas a cada equação apresentada, e, a partir dos dados, algumas considerações puderam ser feitas. Com relação ao p valor, para valores menores que 0,05, pode-se dizer que, para a broca *Brad & Spur*, o fator V_c^2 da equação foi o mais influente para o resultado da força de avanço. Para a broca helicoidal com duas arestas, a constante do modelo, f , f^2 e $V_c f$ foram os fatores que mais influenciaram a força de avanço. Para a broca helicoidal com três arestas, a constante da equação foi o que mais aproximou a equação do valor encontrado para a força de avanço.

TABELA 4.2 - Informações da equação de regressão da broca Brad & Spur.

Preditor	Coefficiente	Erro padrão do coeficiente	Valor T	Valor p
Constante	19,81	25,49	0,78	0,467
V_c	2,0189	0,9545	2,12	0,079
f	459,6	201,4	2,28	0,063
V_c^2	-0,024049	0,009511	-2,53	<u>0,045</u>
f^2	-677,0	582,7	-1,14	0,296
$V_c f$	-3,595	1,782	-2,02	0,090
Desvio Padrão	R-sq	R-sq (adj)		
8,94570	89,8%	81,3%		

TABELA 4.3 – Informações da equação de regressão da broca helicoidal com duas arestas.

Preditor	Coefficiente	Erro padrão do coeficiente	Valor T	Valor p
Constante	73,648	8,407	8,76	<u>0,000</u>
V_c	-0,3573	0,3148	-1,14	0,300
f	281,83	66,42	4,24	<u>0,005</u>
V_c^2	0,001352	0,003137	0,43	0,681
f^2	-473,6	192,2	-2,46	<u>0,049</u>
$V_c f$	-1,8049	0,5877	-3,07	<u>0,022</u>
Desvio Padrão	R-sq	R-sq (adj)		
2,95029	96,3%	93,1%		

TABELA 4.4 - Informações da equação de regressão da broca helicoidal com três arestas.

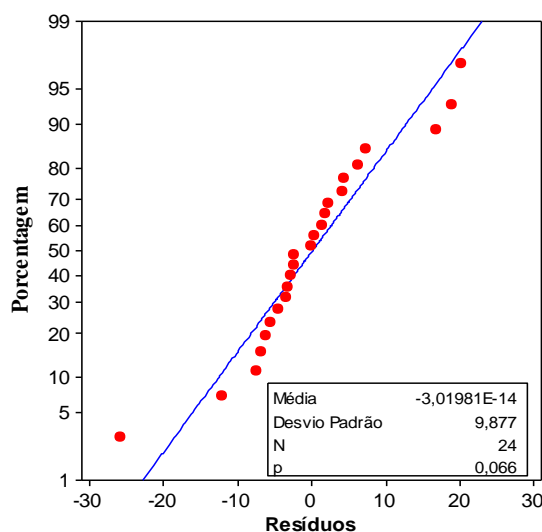
Preditor	Coefficiente	Erro padrão do coeficiente	Valor T	Valor p
Constante	127,14	31,70	4,01	<u>0,007</u>
V_c	0,798	1,187	0,67	0,527
f	421,0	250,4	1,68	0,144
V_c^2	-0,01350	0,01183	-1,14	0,297
f^2	-976,8	724,6	-1,35	0,226
$V_c f$	-1,583	2,216	-0,71	0,502
Desvio Padrão	R-Sq	R – Sq (adj)		
11,1241	79,9%	63,1%		

A validade das equações pode ser comprovada pelo Teste de Anderson-Darling, que prevê a normalidade dos dados. A estatística de Anderson-Darling mede o quão bem os dados seguem uma distribuição normal, e ela pode ser utilizada para determinar se os dados atendem à suposição de normalidade para um teste t.

As hipóteses para o teste Anderson-Darling são:

- H_0 : os dados seguem uma distribuição específica;
- H_1 : os dados não seguem uma distribuição específica;

Deve-se utilizar o valor p para testar se os dados seguem uma distribuição normal. Se o valor de p for menor que um alfa escolhido (nesta pesquisa, considerou-se 0,05), a hipótese nula deve ser rejeitada. Os GRA 4.6, 4.7 e 4.8 são os gráficos de resíduos correspondentes às equações 4.3, 4.4 e 4.5. Os gráficos indicam a validade do modelo com base na análise de p valor, já que todos foram maiores que 0,05. Portanto, foi aceita a hipótese nula e os dados seguiram uma distribuição normal.

GRÁFICO 4.6 - Análise de resíduos para a equação da broca *Brad & Spur*.

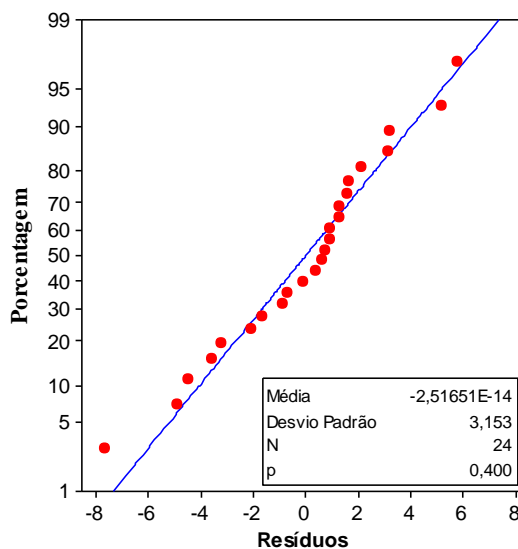


GRÁFICO 4.7 - Análise de resíduos para a equação da broca helicoidal com duas arestas.

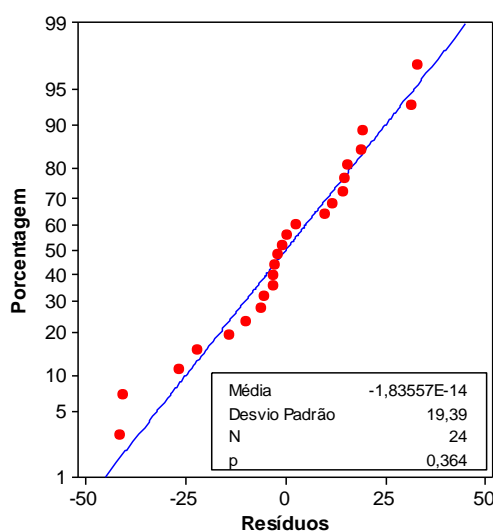


GRÁFICO 4.8 - Análise de resíduos para a equação da helicoidal com três arestas.

Com relação ao R-sq e R-sq (adj) das equações, apresentados nas TAB 4.2, 4.3 e 4.4, puderam-se fazer algumas considerações. A equação de regressão para a broca *Brad & Spur* apresentou um comportamento intermediário com relação aos modelos das outras duas brocas, ou seja, foi o segundo melhor modelo, com a correlação da equação de 89,8 %. A ANOVA realizada separadamente (TAB 4.5) para a broca *Brad & Spur* indicou que apenas a velocidade de corte foi significativa para afetar a força de avanço, e os dados apresentaram uma correlação de 79,23%.

Analogamente à interpretação para a broca *Brad & Spur*, é possível dizer que a broca helicoidal com duas arestas apresentou o melhor modelo para análise de regressão, com uma correlação de 96,3%. De fato, a TAB 4.6, da ANOVA para a broca helicoidal com duas arestas, demonstra que os dados se comportaram com uma correlação de 97,35%, ou seja, a força de avanço depende das condições de

velocidade de corte, avanço e interação velocidade de corte - avanço. Os dados da broca helicoidal com duas arestas seguiram um comportamento previsível; logo, sua equação de regressão obteve maior correlação.

A broca helicoidal com três arestas foi a que apresentou um modelo de regressão com menor correlação dos dados, e o que mais se aproximou da força de avanço foi o coeficiente de ajuste da equação, com um valor de 127, 14. De fato, ao se observar os dados do Apêndice B para a força de avanço, tratam-se de dados insensíveis às alterações dos parâmetros de corte, e que giram em torno da faixa de 127, 14 N. A análise de variância da broca helicoidal com três arestas (TAB 4.7) também revelou a insensibilidade dos dados, mostrando que nenhum fator específico exerceu influência sobre a força de avanço.

TABELA 4.5 - Análise de variância para a broca Brad & Spur.

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Média Quadrática	Valor F	Valor p	Contribuição
V_c	2	5269,7	2634,8	17,58	<u>0,000</u>	60,8%
f	3	469,2	156,4	1,04	0,409	
$V_c * f$	6	1121,7	186,9	1,25	0,349	
Erro	12	1798,2	149,8			
Total	23	8658,7				
Resumo do modelo						
Desvio Padrão	R-sq	R-sq (adj)				
12,2412	79,23%	60,20%				

TABELA 4.6 - Análise de variância para a broca helicoidal com 2 arestas.

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Média Quadrática	Valor F	Valor p	Contribuição
V_c	2	1968,10	984,050	149,80	<u>0,000</u>	66,2%
f	3	659,45	219,818	33,46	<u>0,000</u>	22,1%
$V_c * f$	6	264,41	44,068	6,71	<u>0,003</u>	8,9%
Erro	12	78,83				
Total	23	2970,79				
Resumo do modelo						
Desvio Padrão	R-sq	R-sq (adj)				
2,56304	97,35%	94,91%				

TABELA 4.7 - Análise de variância para a broca helicoidal com 3 arestas.

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Média Quadrática	Valor F	Valor p	Contribuição
V_c	2	1926,4	963,2	2,21	0,153	
f	3	3967,8	1322,6	3,03	0,071	
$V_c * f$	6	3303,5	550,6	1,26	0,344	
Erro	12	5239,9	436,7			
Total	23	14437,7				
Resumo do modelo						
Desvio Padrão	R-sq	R-sq (adj)				
20,8965	63,71%	30,44%				

4.2 Altura da rebarba na saída do furo

Esta seção é dividida em duas subseções. Na seção 4.2.1, fez-se uma análise qualitativa das rebarbas, interpretando as imagens obtidas. Na seção 4.2.2, a análise de variância da altura da rebarba.

4.2.1 Análise qualitativa das rebarbas

As rebarbas obtidas na saída do furo para as brocas *Brad & Spur*, helicoidal com duas arestas e helicoidal com três arestas são apresentadas nas TAB. 4.8, TAB 4.9 e TAB 4.10, respectivamente.

As rebarbas geradas pela broca *Brad & Spur* (TAB 4.8) apresentaram as menores alturas quando comparadas às demais brocas, indicando melhor acabamento para os furos. Além disso, a altura das rebarbas variou entre 0,06 mm e 0,062 mm, de modo que as rebarbas apresentaram aparências muito próximas. De acordo com a classificação de Kim *et al.* (2001), as rebarbas geradas pela broca *Brad & Spur* podem ser classificadas como rebarbas uniformes, com um acabamento padrão em toda a superfície do furo. O melhor acabamento dos furos realizados com a *Brad & Spur* pode ser explicado devido à geometria da broca. Neste caso, a *Brad & Spur* permitiu que o material sob a aresta de corte se deformasse do centro para as arestas da broca, já que o ponto central de corte da broca empurrou o material inicialmente, para depois cortar. Além disso, sua geometria permitiu a limpeza das rebarbas rapidamente, o que facilitou o corte e reduziu os esforços, já que a broca trabalhou apenas para cortar a peça de trabalho, sem que as aparas impactassem na operação.

TABELA 4.8 - Rebarbas na saída do furo para a broca *Brad & Spur*.













	$f=0,05\text{mm/rev}$	$f=0,10\text{ mm/rev}$	$f=0,15\text{ mm/rev}$	$f=0,25\text{ mm/rev}$
$V_c= 24$ m/min				
$V_c= 48$ m/min				
$V_c= 72$ m/min				

TABELA 4.9 - Rebarbas na saída do furo para a broca helicoidal com duas arestas.

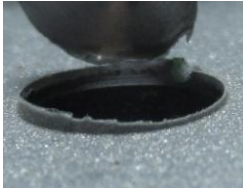



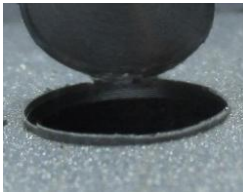







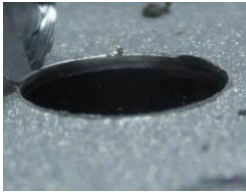


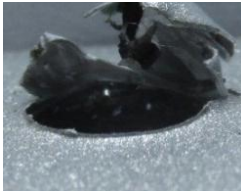



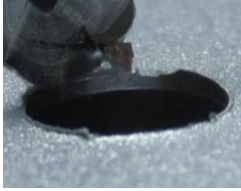

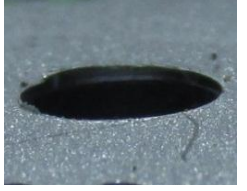


	$f=0,05\text{mm/rev}$	$f=0,10\text{ mm/rev}$	$f=0,15\text{ mm/rev}$	$f=0,25\text{ mm/rev}$
$V_c= 24$ m/min				
$V_c= 48$ m/min				
$V_c= 72$ m/min				

TABELA 4.10 - Rebarbas na saída do furo para a broca helicoidal com três arestas.

	$f=0,05\text{mm/rev}$	$f=0,10\text{ mm/rev}$	$f=0,15\text{ mm/rev}$	$f=0,25\text{ mm/rev}$
$V_c= 24$ m/min				
$V_c= 48$ m/min				
$V_c= 72$ m/min				

Para as rebarbas geradas pela broca helicoidal com duas arestas (TAB 4.9) e helicoidal com três arestas (TAB 4.10), observou-se que, em alguns casos, as rebarbas formaram o “cap” (boina), o que aconteceu devido ao material ter sofrido uma fratura inicial no final das arestas de corte, e a outra parte do material foi dobrada e empurrada para fora.

Também se constatou que as rebarbas geradas pela broca helicoidal com três arestas foram menores que as geradas pela helicoidal com duas arestas. Resultados semelhantes foram obtidos por Faria (2007), Ema *et al.* (1991) e Agapiou (1993). Pode-se dizer, portanto, que o aumento no número de arestas de corte diminuiu a altura da rebarba. Isto ocorre porque, quando se tem mais arestas de corte, o avanço gerado por cada aresta de corte é menor, permitindo o corte efetivo de material, sem empurrá-lo, formando uma rebarba com altura menor.

4.2.2 Análise de variância para a altura da rebarba

Na TAB. 4.11, é apresentada a análise de variância para a altura da rebarba, e, no GRA 4.9, os gráficos de resíduos. Assim como foi observado no gráfico de resíduos para a força de avanço, pode-se dizer que os dados seguiram uma

distribuição normal. O gráfico de probabilidade normal apresenta os resíduos próximos a uma reta, e o gráfico de resíduos versus valor ajustado demonstra que a variância dos resíduos foi constante e que estes não seguiram uma tendência com o valor ajustado. No gráfico de resíduos *versus* valor ajustado, tem-se que os resíduos foram independentes no tempo.

Como se trata de uma distribuição normal, a ANOVA é válida e passível de interpretação. Para um nível de confiança de 95%, os fatores que apresentaram significância para a altura da rebarba foram a ferramenta e a interação ferramenta *versus* avanço. O GRA. 4.10 apresenta a interação entre os parâmetros de corte para a altura da rebarba.

TABELA 4.11 - Análise de variância para altura da rebarba.

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Valor F	Valor p	Contribuição
Ferramenta	2	12,5717	6,28585	22,16	<u>0,000</u>	35,1%
V_c	2	0,3429	0,17146	0,60	0,552	
f	3	1,5735	0,52451	1,85	0,156	
Ferramenta * V_c	4	0,1078	0,02694	0,09	0,983	
Ferramenta * f	6	7,4973	1,24955	4,41	<u>0,002</u>	20,9%
V_c * f	6	0,4771	0,07952	0,28	0,943	
Ferramenta * V_c * f	12	3,0204	0,25170	0,89	0,567	
Erro	36	10,2106				
Total	71	35,8014				
Resumo do modelo						
Desvio Padrão	R-sq	R-sq (adj)				
0,532567	71,48%	43,75%				

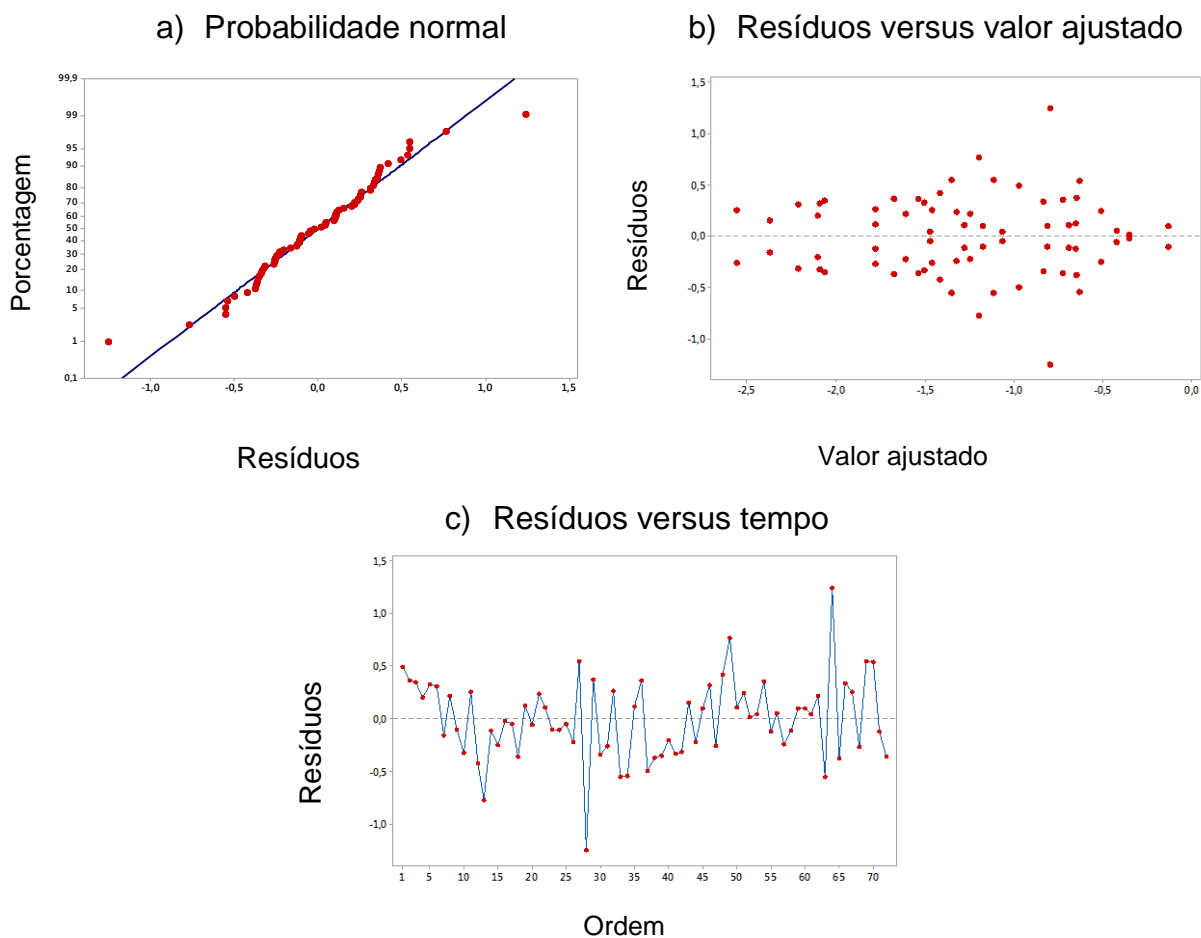


GRÁFICO 4.9 - Análise de resíduos para altura da rebarba: a) Probabilidade normal b) resíduos *versus* valor ajustado c) resíduos *versus* tempo.

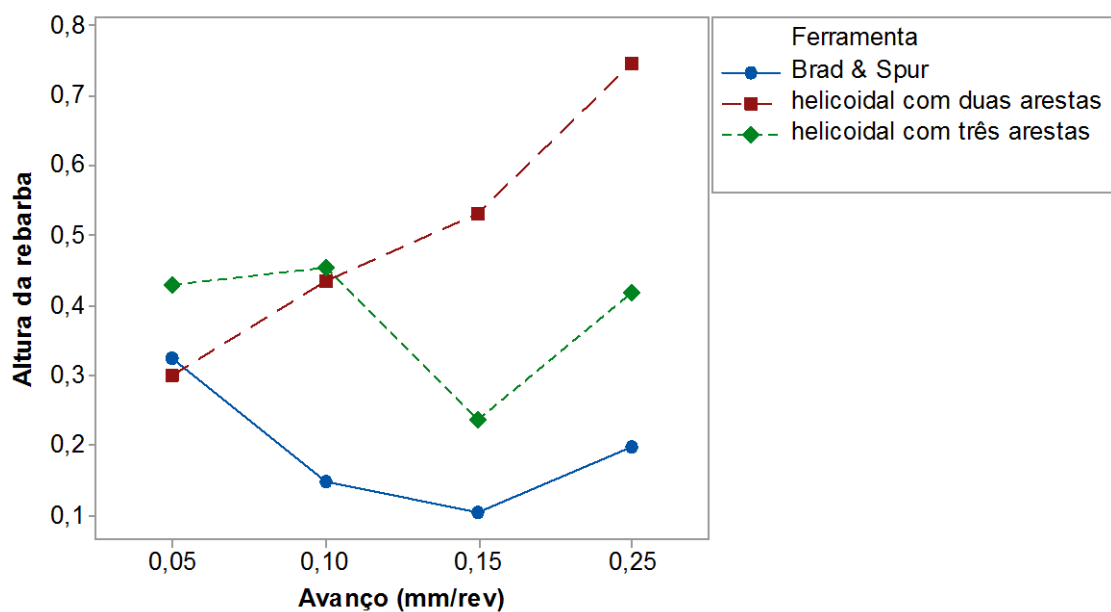


GRÁFICO 4.10 - Interação para a altura da rebarba.

De acordo com a TAB 4.11, a velocidade de corte e o avanço não apresentaram influências significativas para a altura da rebarba, e o fator de maior contribuição foi a geometria da ferramenta. O GRA 4.10 pode ser analisado somente quanto à influência da ferramenta sobre a rebarba, pois o avanço não foi significativo na ANOVA. Desta forma, a única afirmação que pode ser feita por meio da análise do GRA 4.10 é que as menores rebarbas foram obtidas pela broca *Brad & Spur*, enquanto as maiores foram obtidas pela broca helicoidal com duas arestas. Esta observação foi evidenciada nas imagens das rebarbas apresentadas na seção anterior.

4.3 Circularidade

O objetivo desta seção foi analisar a influência dos parâmetros de corte e geometria da ferramenta na qualidade do furo, com relação à circularidade. Os dados de circularidade são apresentados na TAB B.3 do Apêndice B. A TAB 4.12 apresenta a análise de variância para os dados de circularidade, e o GRA 4.11 mostra os gráficos de resíduos, indicando validade do modelo, já que os dados seguiram distribuição normal. Observou-se que os parâmetros mais influentes foram a geometria da ferramenta, o avanço e as interações ferramenta *versus* velocidade de corte e ferramenta *versus* avanço.

TABELA 4.12 - Análise de variância para a circularidade.

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Soma de 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>	
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%				

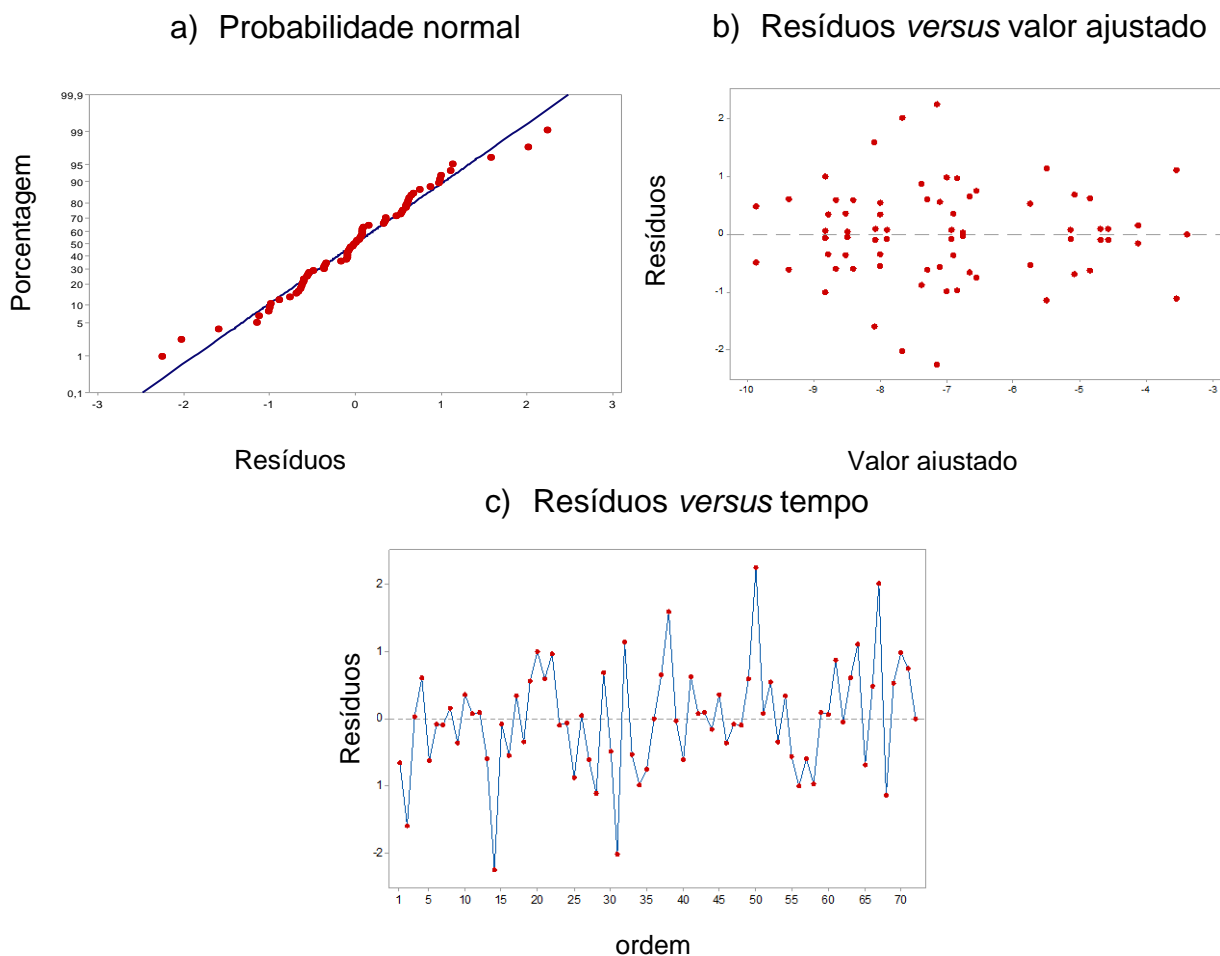


GRÁFICO 4.11 – Análise de resíduos para a circularidade: a) Probabilidade normal b) resíduos *versus* valor ajustado c) resíduos *versus* tempo.

O GRA 4.12 apresenta a interação ferramenta *versus* avanço. De acordo com a ANOVA da TAB 4.12, a ferramenta, o avanço e ferramenta *versus* avanço podem ser analisados.

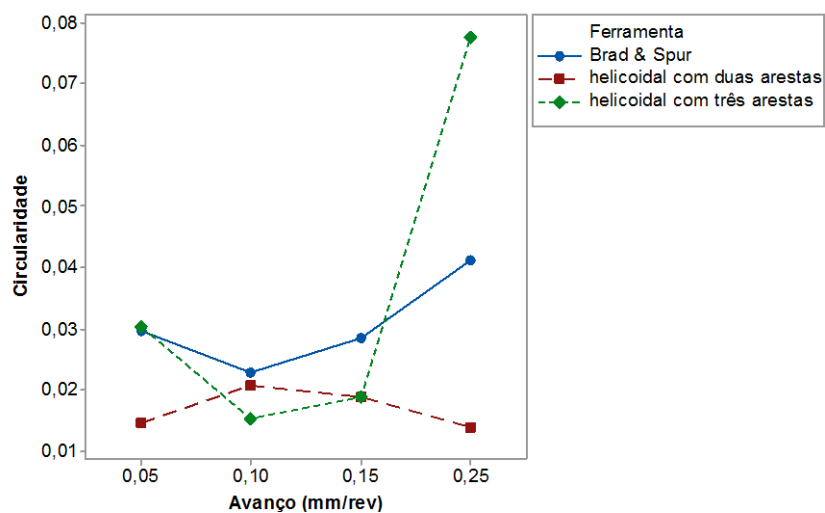


GRÁFICO 4.12 – Interação para a circularidade - ferramenta x avanço

No gráfico de interação ferramenta *versus* avanço, (GRA 4.12), a influência dos dois fatores pode ser analisada. 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 aumentou a 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 a 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.

O GRA 4.13 apresenta a interação ferramenta *versus* velocidade de corte, que foi fator de influência, de acordo com a TAB 4.12. 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 mínimo, 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.

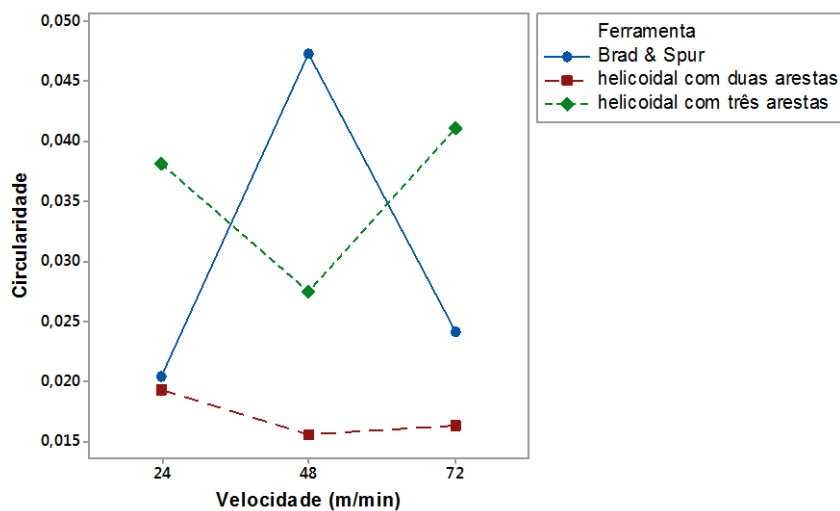


GRÁFICO 4.13 - Interação para a circularidade – ferramenta x velocidade de corte

Para compreender melhor a distribuição dos dados para os valores da circularidade, elaborou-se o boxplot apresentado no GRA 4.14. 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.

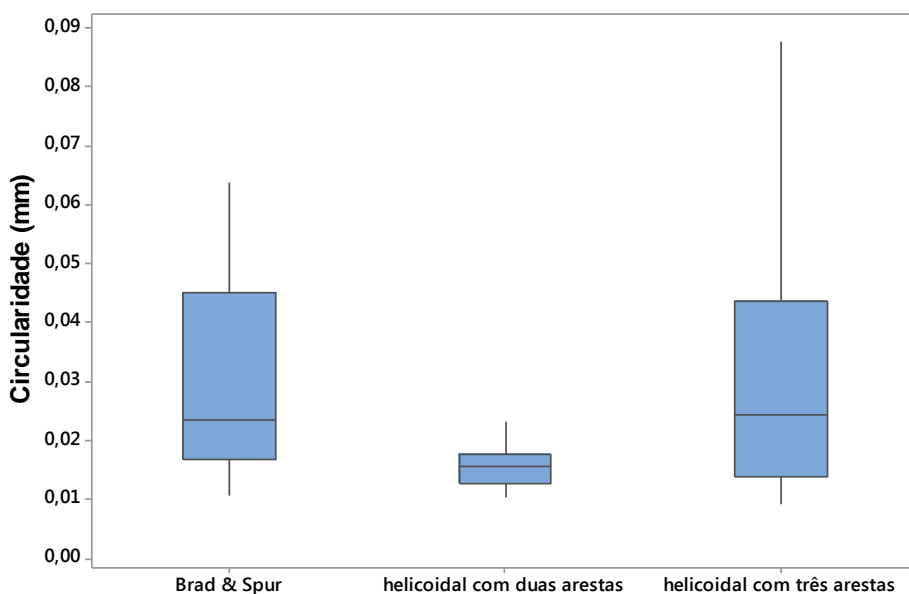


GRÁFICO 4.14 - Boxplot para a circularidade.













O GRA 4.14 indicou que a broca helicoidal com duas arestas apresentou menor variabilidade dos dados, comportamento contrário ao apresentado pela broca helicoidal com três arestas.

4.4 Análise dos cavacos

A análise de cavacos se faz necessária devido à importância deles na operação de furação. A sua formação está relacionada ao desgaste da ferramenta, aos esforços de corte, ao calor gerado durante o processo, entre outros. Os cavacos gerados na furação do PEALL são apresentados nas TAB 4.13, 4.14 e 4.15, respectivamente. Os cavacos mostrados nas imagens são de alumínio e polietileno, sendo que os cavacos de alumínio são menores que os de polietileno, devido à composição do PEALL, que contém duas placas de 0,5 mm de alumínio e 3 mm de polietileno.









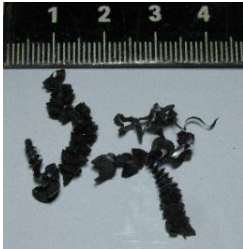



Para os cavacos da TAB 4.13, produzidos na furação com a broca *Brad & Spur*, percebeu-se uma leve tendência de que com o aumento do avanço, eles tenderam a apresentar a forma de fita emaranhados, e, para avanços baixos, foram predominantes os cavacos em fita longos. Não foi observada influência significativa da velocidade de corte sobre a forma do cavaco. Quanto à classificação de acordo com o tipo, foram cavacos contínuos.

TABELA 4.13 - Cavacos gerados na furação com broca Brad & Spur (escala em mm).

	$f=0,05$ mm/rev	$f=0,10$ mm/rev	$f=0,15$ mm/rev	$f=0,25$ mm/rev
$V_c=24$ m/min				
$V_c=48$ m/min				
$V_c=72$ m/min				

Na TAB 4.14, mostra-se que os cavacos gerados pela broca helicoidal com duas arestas também não tiveram influência significativa da velocidade de corte. De maneira geral, para avanços altos, o cavaco apresentou leve tendência de forma helicoidal cônico longo, enquanto a redução do avanço gerou leve tendência de cavacos helicoidais cônicos emaranhados. Quanto ao tipo, apresentaram-se cavacos do tipo contínuos.












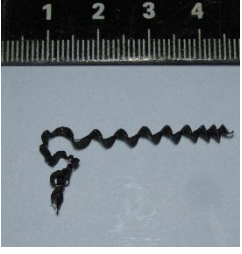
TABELA 4.14 - Cavacos gerados na furação com broca helicoidal com duas arestas (escala em mm).

	$f=0,05$ mm/rev	$f=0,10$ mm/rev	$f=0,15$ mm/rev	$f=0,25$ mm/rev
$V_c= 24$ m/min				
$V_c= 48$ m/min				
$V_c= 72$ m/min				

Por fim, na TAB 4.15, são apresentados os cavacos gerados pela broca helicoidal com três arestas, cujo comportamento foi semelhante ao da helicoidal com duas arestas. A velocidade de corte não teve influência significativa sobre a forma dos cavacos, mas o aumento do avanço alterou levemente a forma dos cavacos de emaranhados para longos. Assim como nos demais casos, os cavacos foram do tipo contínuos.

Uma comparação pode ser feita entre os cavacos gerados pelas brocas helicoidais. Os cavacos da broca helicoidal com três arestas apresentaram maior comprimento que os da broca helicoidal com duas arestas. Isto ocorreu devido ao aumento do número de arestas de corte, que fez com que fosse retirada maior quantidade de material, em vez de empurrá-lo, formando rebarbas. Na seção 4.2.1, esta observação de fato aconteceu; portanto, a broca helicoidal com três arestas produziu rebarbas menores e cavacos de maior comprimento.

TABELA 4.15 - Cavacos gerados na furação com broca helicoidal com três arestas (escala em mm).

	$f = 0,05$ mm/rev	$f = 0,10$ mm/rev	$f = 0,15$ mm/rev	$f = 0,25$ mm/rev
$V_c = 24$ m/min				
$V_c = 48$ m/min				
$V_c = 72$ m/min				

5. CONCLUSÕES

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

Primeiramente, analisou-se a força de avanço apresentada pelas brocas. Os parâmetros principais (ferramenta, velocidade de corte e avanço) e a interação (velocidade de corte x avanço) afetaram significativamente a força de avanço. De maneira geral, o aumento da velocidade de corte reduziu a força de avanço, enquanto a força de avanço elevou com o aumento do avanço.

As menores forças de avanço foram observadas para a broca *Brad & Spur*, com um valor mínimo de 42 N. Sua geometria de corte permitiu que o material fosse empurrado por um ponto central da broca, enquanto as arestas laterais de corte foram responsáveis pelo corte efetivo do PEALL. Com relação ao comportamento gráfico da força de avanço, as brocas helicoidais com duas e três arestas apresentaram comportamentos semelhantes, sendo que a helicoidal com três arestas exibiu as maiores forças de avanço, com um valor máximo de 185 N. Neste caso, o maior ângulo de ponta e o maior número de arestas da broca helicoidal com três arestas explicam os maiores esforços de corte.

A elaboração das equações de regressão permitiu a observação do comportamento individual da força de avanço para cada broca quando submetidas a diferentes condições de corte. A equação obtida para a broca helicoidal com duas arestas foi a que obteve a maior correlação dos dados (96,3%), indicando que a velocidade de corte e o avanço exercem influência na variável resposta força de avanço. Já a broca helicoidal com três arestas apresentou uma equação para a força de avanço insensível aos parâmetros de corte, uma vez que a força de avanço para esta broca se aproximou de um valor constante 127 N.

Para as rebarbas, a análise quantitativa por meio da ANOVA confirmou o que foi mostrado nas imagens, mostrando que as únicas afirmações que podem ser feitas são com relação à influência das geometrias das brocas sobre a rebarba. As rebarbas geradas pelas brocas helicoidais com duas e três arestas foram semelhantes quanto à classificação, pois ambas formaram o *cap* (boina). Entretanto, a broca

helicoidal com três arestas apresentou altura menor que a da helicoidal com duas arestas. Isto aconteceu porque um número maior de arestas permitiu um corte em toda a superfície do furo, cortando o material efetivamente, sem empurrá-lo. Por outro lado, ao se comparar o desempenho das três brocas, os furos com menores rebarbas e, conseqüentemente, com maior qualidade, foram gerados pela broca *Brad & Spur*, o que pode ser explicado pela sua geometria, que permitiu a limpeza das rebarbas.

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.

Por fim, para a análise dos cavacos, as principais formas obtidas foram em fitas longos e emaranhados, para a *Brad & Spur*, e forma helicoidal cônica longa e emaranhada para as brocas helicoidais com duas e três arestas. Quanto à classificação pelo tipo, as três brocas apresentaram cavacos contínuos.

6. PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, novas pesquisas a respeito da furação do PEALL podem ser realizadas, tais como:

- 6.1 Neste trabalho não foram observados defeitos de delaminação, uma sugestão seria realizar a furação do material com parâmetros de corte diferentes e avaliar a ocorrência deste tipo de dano;
- 6.2 Nesta pesquisa foram avaliados somente os erros de circularidade dos furos, mas pode ser feito um estudo aprofundado sobre as variações dimensionais dos furos para melhor caracterizá-los;
- 6.3 Avaliar o efeito da temperatura sobre a qualidade final do furo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 3002-1 (2013). **Grandezas básicas em usinagem e retificação Parte 1: Geometria da parte cortante das ferramentas de corte — Termos gerais, sistemas de referência, ângulos da ferramenta e de trabalho e quebra-cavacos.** 70 p.; 2013.

ABNT NBR 15446 (2013). **Painéis de chapas sólidas de alumínio e painéis de material composto de alumínio utilizados em fachadas e revestimentos arquitetônicos – Requisitos.** 9 p.; 2013.

ABRÃO, A.M. **The machining of annealed and hardened steels using advanced ceramic cutting tools.** Tese (Ph.D.). University of Birmingham, 1995.

AGAPIOU, J.S. Design characteristics of new types of drill and evaluation of their performance drilling cast iron. Drills with four major cutting edges. **International Journal Of Machine Tools And Manufacture**, v. 33, n. 3, p.321-341, 1993.

ALBUQUERQUE, V. H. C.; TAVARES, J. M.; DURÃO, L. M. Evaluation of Delamination Damages on Composite Plates using Techniques of Image Processing and Analysis and a Backpropagation Artificial Neural Network. **Journal of Composite Materials**. v.17, n. 5, p. 120-128, 2009.

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

ARENAS, J.M., ALÍA, C., NARBÓN, J.J., OCAÑA, R., GONZÁLEZ, C. Considerations for the industrial application of structural adhesive joints in the aluminium-composite material bonding. **Composites Part B: Engineering**, v. 44, n. 1, p. 417-423, 2013.

ASKELAND, D.R., FULAY, P.P., WRIGHT, W.J. **The Science and Engineering of Materials.** Sixth Edition. Stamford: Cengage Learning, 2011. 921 p.

ASTAKHOV, V.P. **Drills Science and technology of advanced operations.** New York: CRC Press Taylor & Francis group, 2014. 876 p.

AURICH, J.C., DORNFELD, D., ARRAZOLA, P.J, FRANKE, V., LEITZ L. Burrs - Analysis, control and removal. **Cirp Annals - Manufacturing Technology**, v. 58, n. 2, p.519-542, 2009.

BAYER, R.G. **Mechanical wear prediction and prevention**. First edition. New York: Marcel Dekker, 1994. 657 p.

BORDIN, F. M., NABINGER, E., ZEILMANN, R. **Relação entre o desgaste e a força de avanço na determinação do fim de vida efetivo de uma broca helicoidal**. Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Caxias do Sul – RS - Brasil., v. 01, p. 01 – 09, 2011.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 8ª ed., Rio de Janeiro: LTC, 2008. 844 p.

CHOUHAN, H., SINGH, D., PARMAR, V., KALYANASUNDARAM, D. Laser machining of Kevlar fiber reinforced laminates – Effect of polyetherimide versus polypropylene matrix. **Composites Science And Technology**, v. 134, p.267-274, 2016.

CIMM. **Material didático sobre usinagem**. Disponível em: <http://www.cimm.com.br>. Acesso em Março de 2016.

COUTINHO, F.M.B., MELLO, I.L., SANTA MARIA, L. Polietileno: principais tipos, propriedades e aplicações. **Polímeros: ciência e tecnologia**, v.13, n.1, p. 1-13, 2003.

CUI, X., WANG, D., GUO, J. Performance optimization for cemented carbide tool in high-speed milling of hardened steel with initial microstructure considered. **International Journal Of Mechanical Sciences**, v. 114, p.52-59, 2016.

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

DIN EN 573-3 (2009). **Aluminium und Aluminiumlegierungen – Chemische Zusammensetzung und Form von Halbzeug**. Associação Alemã de Normas Técnicas, 2009.

DINIZ, A.E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 8ª edição. São Paulo: Artliber, 270 p., 2012.

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.

DURÃO, L.M., GONCALVES, D., TAVARES, J.M., ALBUQUERQUE, V.H., VIEIRA A., MARQUES A. Drilling tool geometry evaluation for reinforced composite laminates. **Composite Structures**, v. 92, n.7, p. 1545–1550, 2010.

DURÃO, L.M., MAGALHÃES, A.G., MARQUES, A.G., BAPTISTA, A.M., FIGUEIREDO, M. Drilling of fibre reinforced plastic laminates. **Materials Science Forum**, Vols. 587,588, p. 706-710, 2008.

EMA, S., FUJI, H., MARUI, E. Cutting performance of drills with three cutting edges: effects of chisel edge shapes on the cutting performance. **Int J Mach Tools Manuf.**, v. 31, n. 3, p.361-369, 1991.

FANG, Z.Z., SOHN, H.Y. **Development of bulk nanocrystalline cemented tungsten carbide for industrial applications**. Salt Lake City, UT: University of Utah, 2009.

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.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo: Edgard Blucher, 1977, 754 p.

GAGLIARDO, D.P., MASCIA, N.T. Análise de estruturas sanduíche: parâmetros de projeto. **Ambient. Constr. (online)**, v. 10, n. 4, p.247-258, 2010.

GAITONDE, V., KARNIK, S.R., RUBIO, J.C., ABRÃO, A.M., CORREIA, A.E., DAVIM, J.P. Surface roughness analysis in high-speed drilling of unreinforced and reinforced polyamides. **Journal Of Composite Materials**, v. 46, n. 21, p.2659-2673, 2011.

GOUVEIA G.M., SPOSTO R.M. Análise energético-ambiental de fachadas com foco na reciclagem - Estudo de caso com painéis de alumínio composto "ACM" em Brasília. **Arquitextos**, v. 16, n. 181.06, 2015.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. London: Ed. Edward Arnold, 1992, 273 p.

ISO 3685. **Tool life testing with single – point turning tools**. 1993.

ISO Standard n. 513 (E). **Classification and application of hard cutting materials for metal removal with defined cutting edges**. Designation of Main Groups of Application, 2004.

KALIN, M., JERINA, J. The effect of temperature and sliding distance on coated (CrN, TiAlN) and uncoated nitrided hot-work tool steels against an aluminium alloy. **Wear**, v.330-331, p. 371-379, 2015.

KENDALL, D. The Selection of Reinforcing Fibres for Strengthening Concrete and Steel Structures using Reinforced Plastics. **International Structural Faults and Repair**, v.8, 1999.

KHASHABA, U.A. Drilling of polymer matrix composites: A review. **Journal of composite materials**, v.47, n.15, p. 1817-1832, 2012.

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**, v.41, n.7, p.923-936, 2001.

KÖNIG, W., KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren: drehen, fräsen, bohren**. 5^a ed. Berlin: Springer, 1997, 471 p.

LACHAUD, F., PIQUET, R., COLLOMBET, F. Drilling of composite Structures. **Compos Structures**, v. 52, n. 3-4, p. 511-516, 2001.

LATHA, B., SENTHILKUMAR, V.S, PALANIKUMAR, K. Influence of drill geometry on thrust force in drilling GFRP composites. **Journal of reinforced plastics and composites**, v. 30, n.6, p. 463,472, 2011.

LIZARDO, B.F., VIEIRA, L. M. G., RUBIO, J. C. C., CÂMARA, M. A. Influence of Machining Parameters of the Drilling Polymers UHMW-PE and PTFE. **Advanced Materials Research**, v. 1120-1121, p. 1297-1301, 2015.

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. **Design and Analysis of Experiments**. New York: John Wiley; 2004.

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

MONTOYA, M., CALAMAZ, M., GEHIN, D., GIROT, F.A. Evaluation of the performance of coated and uncoated carbide tools in drilling thick CFRP/aluminium alloy stacks. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, v. 68, n. 9-12, p.2111-2120, 2013.

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.

PILIPCHUK, V.N., IBRAHIM, R.A., GRACE, I. Low temperature brittle debond damage under normal compression of sandwich plates: Analytical modeling and experimental validation. **Composite Structures**, v. 98, p.24-33, 2013.

REZENDE, B.A. **Estudo da furação de um material compósito tipo sanduíche**. 2016. 110 p. Belo Horizonte, Escola de Engenharia da UFMG, 2016. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica.

REZENDE, B.A., SILVEIRA, M.L., VIEIRA, L.M.G., ABRÃO, A.M., FARIA, P.E., RUBIO, J.C.C. Investigation on the Effect of Drill Geometry and Pilot Holes on Thrust Force and Burr Height When Drilling an Aluminium/PE Sandwich Material. **Materials**, v.9, n. 9, p.774, set, 2016.

RUBIO, C.V., VIEIRA, L.M.G., RUBIO, J.C.C. **Desenvolvimento de um compósito híbrido Alumínio-Borracha**. V Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção-COMBREPRO, 5. Ponta Grossa - PR, 2015.

RUBIO, J., ABRÃO, A., FARIA, P.E., DAVIM, P. Análise digital de dano na furação de materiais compósitos laminados. **Ciência e Tecnologia dos Materiais**, v. 19. n. 1/2, p. 19-24, 2007.

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.

SHAW, M.C. **Metal cutting principles**. Oxford: Oxford Science Publications, 1984. 594 p.

SRINIVASAN, T., PALANIKUMAR, K., RAJAGOPAL, K. Influence of thrust force in drilling of glass fiber reinforced polycarbonate (GFR/PC) thermoplastic matrix composites using box-behnen design. **Procedia Materials Science**, v. 5, p. 2152-2158, 2014.

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

SUPORTE MINITAB. **Tipos de análise de regressão**. Disponível em: support.minitab.com. Acesso em outubro de 2016.

TSAO CC., HOCHENG, H. The path towards delamination- free drilling of composite laminates. **Journal Of Materials Processing Technology**, v. 167, n. 2-3, p.251-264, 2005.

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.

XAVIER, J., BELINI, U., PIERRON, F., MORAIS, J., LOUSADA, J. TORMAZELLO, M. Characterisation of the bending stiffness components of MDF panels from full-field slope measurements. **Wood Science And Technology**, v. 47, n. 2, p.423-441, 2012.

YANG, P., SHAMS, S.S., SLAY, A., BROKATE, B., ELHAJJAR, R. Evaluation of temperature effects on low velocity impact damage in composite sandwich panels with polymeric foam cores. **Composite Structures**, v. 129, p. 213-223, 2015.

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.

ZUM GAHR, K. H. **Microstructure and wear of materials - Tribology series**. Amsterdam: Elsevier, 1987, v.10.

APÊNDICE A

Dados utilizados para calibração e equação de regressão da força de avanço x diferença de potencial

TABELA A.1 - Dados utilizados para calibração.

Massa (Kg)	Força (N)	Diferença de potencial (V)
0	0	0
0,626	6,138963	0,2
1,258	12,33677	0,4
1,52	14,90611	0,6
1,884	18,47573	0,8
2,552	25,02657	1,1
2,814	27,59591	1,2
3,06	30,00835	1,4
3,236	31,73432	1,5
4,08	40,01113	1,9
4,326	42,42357	2,1

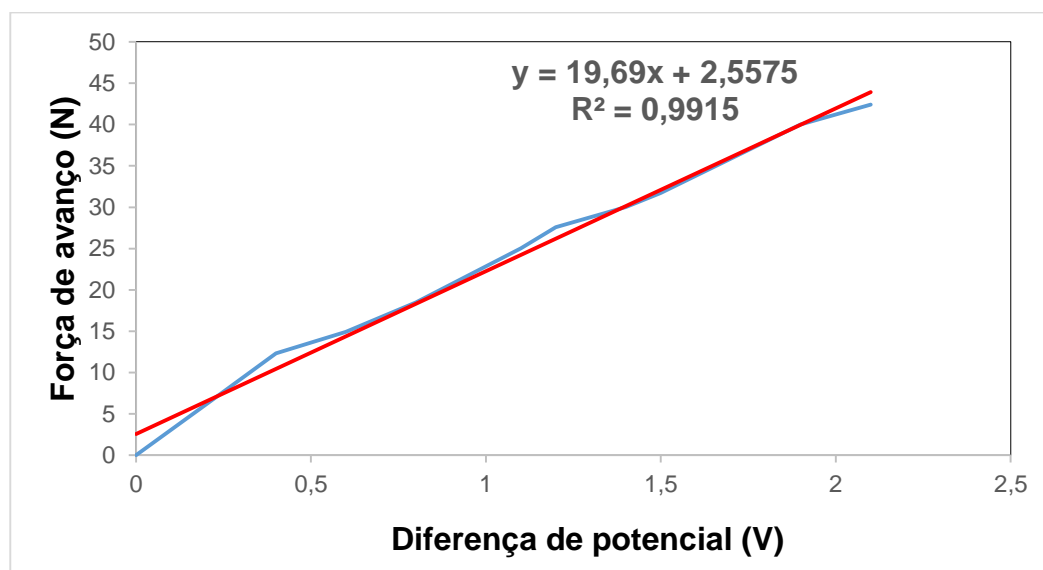


GRÁFICO A.1 - Gráfico força de avanço x diferença de potencial.

APÊNDICE B

Resultados para as medições da força de avanço, altura da rebarba e circularidade

TABELA B.1 - Resultados para as medições da força de avanço (Ff).

Furo	Ferramenta	Velocidade de corte (m/min)	Avanço (mm/rev)	Força de Avanço (N) - Testes	Força de Avanço (N) – Réplica
1	<i>Brad & Spur</i>	24	0,05	66,76	70,53
2	<i>Brad & Spur</i>	24	0,10	79,99	84,85
3	<i>Brad & Spur</i>	24	0,15	104,11	77,87
4	<i>Brad & Spur</i>	24	0,25	94,95	98,43
5	<i>Brad & Spur</i>	48	0,05	75,45	75,27
6	<i>Brad & Spur</i>	48	0,10	69,25	59,96
7	<i>Brad & Spur</i>	48	0,15	94,66	48,54
8	<i>Brad & Spur</i>	48	0,25	77,44	98,87
9	<i>Brad & Spur</i>	72	0,05	55,66	55,28
10	<i>Brad & Spur</i>	72	0,10	50,03	47,70
11	<i>Brad & Spur</i>	72	0,15	42,30	55,21
12	<i>Brad & Spur</i>	72	0,25	46,84	43,23
13	Helicoidal com 2 arestas	24	0,05	65,77	75,52
14	Helicoidal com 2 arestas	24	0,10	88,47	89,03
15	Helicoidal com 2 arestas	24	0,15	85,28	86,98
16	Helicoidal com 2 arestas	24	0,25	96,68	96,04
17	Helicoidal com 2 arestas	48	0,05	65,02	66,62
18	Helicoidal com 2 arestas	48	0,10	74,20	76,42
19	Helicoidal com 2 arestas	48	0,15	77,62	77,04
20	Helicoidal com 2 arestas	48	0,25	73,27	78,97
21	Helicoidal com 2 arestas	72	0,05	57,86	60,51
22	Helicoidal com 2 arestas	72	0,10	65,20	68,02
23	Helicoidal com 2 arestas	72	0,15	65,12	63,23
24	Helicoidal com 2 arestas	72	0,25	63,43	63,08
25	Helicoidal com 3 arestas	24	0,05	87,58	148,10
26	Helicoidal com 3 arestas	24	0,10	184,21	185,51
27	Helicoidal com 3 arestas	24	0,15	127,62	165,18
28	Helicoidal com 3 arestas	24	0,25	176,49	170,67
29	Helicoidal com 3 arestas	48	0,05	98,65	144,13
30	Helicoidal com 3 arestas	48	0,10	121,70	159,45
31	Helicoidal com 3 arestas	48	0,15	144,45	164,17
32	Helicoidal com 3 arestas	48	0,25	147,02	164,05
33	Helicoidal com 3 arestas	72	0,05	118,66	136,72
34	Helicoidal com 3 arestas	72	0,10	153,27	124,28
35	Helicoidal com 3 arestas	72	0,15	142,99	141,65
36	Helicoidal com 3 arestas	72	0,25	123,76	129,25

TABELA B.2 - Resultados para as medições da altura da rebarba (mm)

Furo	Ferramenta	Velocidade de corte (m/min)	Avanço (mm/rev)	Altura da rebarba (mm) - Testes	Altura da Rebarba (mm) - Réplica
1	<i>Brad & Spur</i>	24	0,05	0,62	0,23
2	<i>Brad & Spur</i>	24	0,10	0,27	0,13
3	<i>Brad & Spur</i>	24	0,15	0,18	0,09
4	<i>Brad & Spur</i>	24	0,25	0,15	0,1
5	<i>Brad & Spur</i>	48	0,05	0,31	0,16
6	<i>Brad & Spur</i>	48	0,10	0,15	0,08
7	<i>Brad & Spur</i>	48	0,15	0,08	0,11
8	<i>Brad & Spur</i>	48	0,25	0,25	0,16
9	<i>Brad & Spur</i>	72	0,05	0,28	0,34
10	<i>Brad & Spur</i>	72	0,10	0,09	0,17
11	<i>Brad & Spur</i>	72	0,15	0,1	0,06
12	<i>Brad & Spur</i>	72	0,25	0,16	0,37
13	Helicoidal com 2 arestas	24	0,05	0,14	0,65
14	Helicoidal com 2 arestas	24	0,10	0,45	0,56
15	Helicoidal com 2 arestas	24	0,15	0,47	0,77
16	Helicoidal com 2 arestas	24	0,25	0,69	0,72
17	Helicoidal com 2 arestas	48	0,05	0,22	0,24
18	Helicoidal com 2 arestas	48	0,10	0,34	0,69
19	Helicoidal com 2 arestas	48	0,15	0,59	0,46
20	Helicoidal com 2 arestas	48	0,25	0,62	0,69
21	Helicoidal com 2 arestas	72	0,05	0,34	0,21
22	Helicoidal com 2 arestas	72	0,10	0,31	0,25
23	Helicoidal com 2 arestas	72	0,15	0,4	0,49
24	Helicoidal com 2 arestas	72	0,25	0,79	0,97
25	Helicoidal com 3 arestas	24	0,05	0,33	0,36
26	Helicoidal com 3 arestas	24	0,10	0,23	0,36
27	Helicoidal com 3 arestas	24	0,15	0,45	0,15
28	Helicoidal com 3 arestas	24	0,25	0,13	1,57
29	Helicoidal com 3 arestas	48	0,05	0,76	0,36
30	Helicoidal com 3 arestas	48	0,10	0,31	0,61
31	Helicoidal com 3 arestas	48	0,15	0,18	0,3
32	Helicoidal com 3 arestas	48	0,25	0,22	0,13
33	Helicoidal com 3 arestas	72	0,05	0,19	0,57
34	Helicoidal com 3 arestas	72	0,10	0,31	0,91
35	Helicoidal com 3 arestas	72	0,15	0,19	0,15
36	Helicoidal com 3 arestas	72	0,25	0,31	0,15

TABELA B.3 - Resultados para as medições de circularidade (mm).

Furo	Ferramenta	Velocidade de corte (m/min)	Avanço (mm/rev)	Circularidade (mm) - Testes	Circularidade (mm) - Réplica
1	<i>Brad & Spur</i>	24	0,05	0,019	0,028
2	<i>Brad & Spur</i>	24	0,10	0,011	0,024
3	<i>Brad & Spur</i>	24	0,15	0,022	0,022
4	<i>Brad & Spur</i>	24	0,25	0,022	0,016
5	<i>Brad & Spur</i>	48	0,05	0,033	0,056
6	<i>Brad & Spur</i>	48	0,10	0,037	0,039
7	<i>Brad & Spur</i>	48	0,15	0,046	0,050
8	<i>Brad & Spur</i>	48	0,25	0,064	0,054
9	<i>Brad & Spur</i>	72	0,05	0,019	0,023
10	<i>Brad & Spur</i>	72	0,10	0,015	0,013
11	<i>Brad & Spur</i>	72	0,15	0,016	0,016
12	<i>Brad & Spur</i>	72	0,25	0,047	0,044
13	Helicoidal com 2 arestas	24	0,05	0,012	0,015
14	Helicoidal com 2 arestas	24	0,10	0,011	0,042
15	Helicoidal com 2 arestas	24	0,15	0,020	0,021
16	Helicoidal com 2 arestas	24	0,25	0,014	0,018
17	Helicoidal com 2 arestas	48	0,05	0,017	0,014
18	Helicoidal com 2 arestas	48	0,10	0,012	0,014
19	Helicoidal com 2 arestas	48	0,15	0,023	0,017
20	Helicoidal com 2 arestas	48	0,25	0,016	0,010
21	Helicoidal com 2 arestas	72	0,05	0,016	0,012
22	Helicoidal com 2 arestas	72	0,10	0,029	0,016
23	Helicoidal com 2 arestas	72	0,15	0,015	0,016
24	Helicoidal com 2 arestas	72	0,25	0,013	0,013
25	Helicoidal com 3 arestas	24	0,05	0,015	0,024
26	Helicoidal com 3 arestas	24	0,10	0,014	0,014
27	Helicoidal com 3 arestas	24	0,15	0,010	0,013
28	Helicoidal com 3 arestas	24	0,25	0,046	0,169
29	Helicoidal com 3 arestas	48	0,05	0,052	0,030
30	Helicoidal com 3 arestas	48	0,10	0,009	0,011
31	Helicoidal com 3 arestas	48	0,15	0,011	0,031
32	Helicoidal com 3 arestas	48	0,25	0,053	0,023
33	Helicoidal com 3 arestas	72	0,05	0,025	0,037
34	Helicoidal com 3 arestas	72	0,10	0,016	0,028
35	Helicoidal com 3 arestas	72	0,15	0,019	0,030
36	Helicoidal com 3 arestas	72	0,25	0,088	0,087