

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE HÉLICE  
EM BROCAS DE METAL DURO NA FURAÇÃO DE  
ALUMÍNIO AERONÁUTICO**

SÃO CARLOS - SP  
2022

RICARDO APARECIDO BUZINARI

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE HÉLICE EM BROCAS DE METAL  
DURO NA FURAÇÃO DE ALUMÍNIO AERONÁUTICO

Dissertação apresentada ao Programa  
de Pós-Graduação em Engenharia  
Mecânica da Universidade Federal de  
São Carlos para obtenção do título de  
mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Franco  
Barbosa

Coorientador: Prof. Dr. Sidney Bruce  
Shiki

São Carlos - SP

2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

**Folha de aprovação**

Assinatura dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Mestrado do candidato Ricardo Aparecido Buzinari, realizada em data da defesa:

---

Prof. Dr. Gustavo Franco Barbosa (orientador)  
DEMec - UFSCar

---

Prof. Dr. Armando Ítalo Sette Antonialli  
DEMec - UFSCar

---

Prof. Dr. Iris Bento da Silva  
EESC - USP

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus por me dar sabedoria e discernimento nas horas difíceis que temos que optar em dar atenção e focar nos nossos estudos ao invés de dar atenção aos nossos familiares.

Também agradeço aos nossos professores Prof. Dr. Gustavo Franco Barbosa (DEMec/UFSCAR) e Prof. Dr. Sidney Bruce Shiki (DEMec/UFSCAR) por nos fomentar com direcionamento e informações precisas para realização dos nossos trabalhos.

Aos meus pais, por ter me guiado até aqui.

Também não poderia esquecer do meu grupo de estudos composto pelos discentes Sr. André Gunes, Sr. Jose Otávio e Sr. Wesley Soares, pela nova amizade e parceria de ajuda mútua que tivemos desde o início da nossa jornada. Sem a ajuda desse time não conseguiríamos superar os momentos difíceis que atravessamos impostas por esta Pandemia Global que estamos vivenciando, que é o maior mal do século que nossa geração é obrigada a conviver e combater.

## RESUMO

A utilização de ligas de Alumínio na usinagem oferece muitas vantagens: alta velocidade de corte, baixas forças de corte, desgaste mínimo das ferramentas e temperatura de usinagem relativamente baixa. Na usinagem de ligas de alumínio, sempre é aconselhável utilizar ferramentas com configurações geométricas projetadas especificamente para esta aplicação. Com a ferramenta devidamente configurada conseguimos obter um furo final dentro da tolerância, acabamento, e cilindricidade solicitada pelo produto usinado. Conforme tais propósitos, estudos direcionados à aplicação de ângulos de hélices apropriados e associados à parâmetros de corte coerentes para usinagem do alumínio, se fazem necessários para a obtenção de um furo com a devida qualidade exigida pelo produto ou processo. Desta forma, neste trabalho realizou-se um estudo de variação de ângulos de hélices de 20°, 30° e 40° associados às variações dos parâmetros velocidade de corte e avanço na usinagem de corpos de prova de alumínio aeronáutico 7475, material este mais utilizado em processos produtivos da indústria aeroespacial. Para a obtenção dos resultados os corpos de prova foram devidamente acompanhados e monitorados furo a furo, com as variações acima citadas para a devida coleta de dados em relação a alteração do ângulo de hélice e parâmetros de corte, onde poderá ser observado também a variação da vibração do conjunto peça e ferramenta aplicada. Os resultados indicaram que os furos obtidos com os ângulos de 20° e 40° apresentaram variações nos valores de seus diâmetros que não são admissíveis no setor aeronáutico, devido às exigências de qualidade que visam promover a segurança das aeronaves fabricadas. O ângulo de 30° mostrou-se o mais adequado para a operação de furação, pois este proporcionou maior controle dimensionais dos furos e ausência de rebarbas na usinagem, o que contribui para um bom acabamento interno dos furos.

**Palavras-chave:** Furação. Alumínio Aeronáutico. Ângulo de Hélice. Broca de Metal Duro.

## ABSTRACT

*The use in machining aluminum alloys offers many advantages: high cutting speed, low cutting forces, minimal tool wear and relatively low machining temperature. When machining aluminum alloys, it is always advisable to use tools with geometric configurations specifically designed for this application. With the tool properly configured, we were able to obtain a final hole within the tolerance, finish, and cylindricity required by the machined product. According to such purposes, studies aimed at the application of appropriate propeller angles and associated with coherent cutting parameters for machining aluminum, are necessary to obtain a hole with the proper quality required by the product or process. Thus, in this work, a study was carried out on the variation of propeller angles of 20°, 30° and 40° associated with variations in the cutting speed and feed parameters in the machining of 7475 aeronautical aluminum specimens, a material that is most used in production processes of the aerospace industry. In order to obtain the results, the specimens were duly monitored and monitored hole by hole, with the aforementioned variations for the proper collection of data in relation to the change in the helix angle and cutting parameters, where the variation of vibration can also be observed. of the applied workpiece and tool set. The results indicated that the holes obtained with the angles of 20° and 40° presented variations in the values of their diameters that are not admissible in the aeronautical sector, due to the quality requirements that aim to promote the safety of the manufactured aircraft. The 30° angle proved to be the most suitable for the drilling operation, as it provided greater dimensional control of the holes and absence of burrs in the machining, which contributes to a good internal finish of the holes.*

**Keywords:** *Drilling Process. Aeronautical Aluminum. Helix angle. Drill bit hard metal.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Materiais utilizados na fabricação das aeronaves.....	17
Figura 2 - Materiais utilizados na fabricação do A350 XWB.....	17
Figura 3 - Materiais compósitos distribuídos na fabricação do Boeing 787 Dreamliner.....	18
Figura 4 - Cinética dos movimentos atuantes no processo de furação. ....	22
Figura 5 - Fatores que influenciam a qualidade do furo no processo de furação. ....	23
Figura 6 - Fenômeno da geração de rebarbas e cavacos em um processo de furação. ....	24
Figura 7 - Geometrias associadas aos erros do processo de furação. ....	26
Figura 8 - Processo de criação de manchas superficiais: a) antes da usinagem e b) após a usinagem. ....	28
Figura 9 - Processo de furação manual na indústria aeroespacial.....	29
Figura 10 - Geometrias fundamentais de uma broca helicoidal. ....	31
Figura 11 - Geometrias fundamentais da ponta da broca helicoidal. ....	32
Figura 12 - Geometrias de afiação para a suavização do efeito do gume transversal. ....	33
Figura 13 - Principais ângulos e superfícies em uma broca helicoidal.....	34
Figura 14 – Corpo de prova em perspectiva. ....	40
Figura 15 – Vista frontal do corpo de prova (dimensões em mm). ....	41
Figura 16 - Amostra espectral da furação gerado pelo CAD CAM.....	42
Figura 17 - Características Técnicas – ROMI modelo D800.....	42
Figura 18 – Dimensões (em mm) das ferramentas utilizadas nos ensaios. ....	43
Figura 19 - Dimensões (em mm) das ferramentas utilizadas nos ensaios. ....	44
Figura 20 - Máquina de Medição Tridimensional Referenciada. ....	45
Figura 21 - Posição em X, Y e Z do CDP para medição.....	45
Figura 22 - Fixação da ferramenta. ....	47
Figura 23 - Placa Arduino.....	47
Figura 24 - Placa Arduino fixada na base do CDP a ser usinado.....	48
Figura 25 - Computador utilizado para coletar dados gráficos durante a usinagem. ....	49
Figura 26 - Entrada do furo do CDP realizado com broca de ângulo de Hélice 30°. ....	50
Figura 27 - Entrada do furo do CDP realizado com broca de ângulo de Hélice 20°. ....	51
Figura 28 - Entrada do furo do CDP realizado com broca de ângulo de Hélice 40°. ....	51
Figura 29 - Saída do furo do CDP realizado com broca de ângulo de Hélice 30°. ....	52
Figura 30 - Saída do furo do CDP realizado com broca de ângulo de Hélice 20°. ....	53
Figura 31 - Saída do furo do CDP realizado com broca de ângulo de Hélice 40°. ....	54
Figura 32 - Cavaco gerado com Broca com Ângulo de Hélice 20° vc=80 m/min. ....	55
Figura 33 - Cavaco gerado com Broca com Ângulo de Hélice 20° vc=100 m/min. ....	55
Figura 34 - Cavaco gerado com Broca com Ângulo de Hélice 40° vc=80 m/min. ....	56
Figura 35 - Cavaco gerado com Broca com Ângulo de Hélice 40° vc=100 m/min. ....	56
Figura 36 - Cavaco gerado com Broca com Ângulo de Hélice 30° vc=80 m/min. ....	57
Figura 37 - Cavaco gerado com Broca com Ângulo de Hélice 30° vc=100 m/min. ....	57
Figura 38 - Broca, com ângulo de hélice 30°, nova.....	58
Figura 39 - Broca, com ângulo de ponta 30°, após 196 furos com vc de 80 e 100	

m/min .....	59
Figura 40 - Características dimensionais dos furos – Hélice 30°, 80 m/min. ....	62
Figura 41 - Características dimensionais dos furos – Hélice 30°, 100 m/min. ....	63
Figura 42 – Broca com ângulo de hélice 40°, nova. ....	64
Figura 43 - Broca, com ângulo de hélice de 40°, após 196 furos. ....	64
Figura 44 - Características dimensionais dos furos – Hélice 40°, 80 m/min. ....	67
Figura 45 - Características dimensionais dos furos – Hélice 40°, 100 m/min. ....	68
Figura 46 – Broca com ângulo de hélice 20°, nova. ....	69
Figura 47 – Broca com ângulo de ponta 20°, após 196 furos. ....	69
Figura 48 - Características dimensionais dos furos – Hélice 20°, 80 m/min. ....	72
Figura 49 - Características dimensionais dos furos – Hélice 20°, 100 m/min. ....	73



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização das ligas de alumínio.....	20
Tabela 2 - Características Geométricas de Fabricação das brocas. ....	44
Tabela 3 – Equações dos parâmetros de corte.....	46
Tabela 5 - Diâmetro dos furos – Ângulo de Hélice 30° vc=80 m/min. ....	59
Tabela 6 - Diâmetro dos furos – Ângulo de Hélice 30° (réplica) vc=80 m/min. ....	60
Tabela 7 - Diâmetro dos furos – Ângulo de Hélice 30° vc=100 m/min. ....	60
Tabela 8 - Diâmetro dos furos – Ângulo de Hélice 30° (réplica) vc=100 m/min.....	61
Tabela 9 - Diâmetro dos furos – Ângulo de Hélice 40° vc=80 m/min. ....	65
Tabela 10 - Diâmetro dos furos – Ângulo de Hélice 40° vc=80 m/min (continuação). .....	65
Tabela 11 - Diâmetro dos furos – Ângulo de Hélice 40° (réplica) vc=80 m/min.....	65
Tabela 12 - Diâmetro dos furos – Ângulo de Hélice 40° vc=100 m/min. ....	66
Tabela 13 - Diâmetro dos furos – Ângulo de Hélice 40° (réplica) vc=100 m/min.....	66
Tabela 14 - Diâmetro dos furos – Ângulo de Hélice 20° vc=80 m/min. ....	70
Tabela 15 - Diâmetro dos furos – Ângulo de Hélice 20° (réplica) vc=80 m/min ....	70
Tabela 16 - Diâmetro dos furos – Ângulo de Hélice 20° vc=100 m/min. ....	71
Tabela 17 - Diâmetro dos furos – Ângulo de Hélice 20° (réplica) vc=100 m/min.....	71

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AI	<i>Artificial Intelligence</i>
ANN	<i>Artificial Neural Network</i>
ANOVA	Aplicação da Análise de Variância
APC	Aresta Postiça de Corte
CNC	Controle Numérico Computadorizado
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
DIN	<i>Deutsche Industrie fur Normen</i>
GPU	<i>Graphical Processing Unit</i>
I4.0	Indústria 4.0
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
RSM	<i>Response Surface Metodology</i>
TSP	<i>Traveling Salesman Problem</i>
VUCA	Volatilidade, incerteza, complexidade, ambiguidade

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>16</b>
<b>3. REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>16</b>
3.1 ALUMÍNIO E SUAS LIGAS .....	16
3.2 PROCESSO DE FURAÇÃO.....	21
<b>3.2.1 Processo de furação na indústria aeroespacial</b> .....	<b>27</b>
<b>3.2.2 Processo de furação automatizado na indústria aeroespacial</b> .....	<b>30</b>
<b>3.2.3 Brocas Helicoidais</b> .....	<b>30</b>
<b>3.2.4 Esforços tecnológicos para o desenvolvimento do processo de furação</b> .....	<b>35</b>
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>39</b>
4.1 CORPOS DE PROVA .....	40
4.3 DISPOSIÇÃO DE FURAÇÃO NO CDP.....	41
4.4 MÁQUINA-FERRAMENTA.....	42
4.5 FERRAMENTAS DE CORTE .....	43
4.6 MEDIÇÃO DO DIÂMETRO DOS FUROS .....	44
4.7 CONDIÇÕES OPERACIONAIS DOS EXPERIMENTOS .....	46
4.8 CONDIÇÕES OPERACIONAIS DOS PERIFÉRICOS DE MEDIÇÃO.....	47
4.9 ESTRUTURA PARA COLETA DE DADOS DO ARDUINO.....	48
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>50</b>
5.1 COMPORTAMENTO DOS CAVACOS.....	54
5.2 PRIMEIRO ENSAIO - ÂNGULO DE HÉLICE DE 30° .....	57
5.3 SEGUNDO ENSAIO - ÂNGULO DE HÉLICE DE 40° .....	63
5.4 TERCEIRO ENSAIO - ÂNGULO DE HÉLICE 20 ° .....	68
<b>6. CONCLUSÕES</b> .....	<b>74</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>76</b>



## 1. INTRODUÇÃO

O panorama do cenário econômico mundial na atualidade vem sofrendo as consequências do avanço tecnológico, que resultam em características peculiares e que estão definidas no *framework* VUCA, que consiste em uma sigla para Volatilidade, Incerteza, Complexidade e Ambiguidade. Claramente este *framework* reflete o comportamento do mercado, onde a cada segundo os tomadores de decisão possuem uma série de alternativas com consequências imprevisíveis para cada cenário, onde as informações se alteram de maneira muito rápida (DU; CHEN, 2018; GIONES; BREM; BERGER, 2019; XING *et al.*, 2019).

Outro fator relevante é o crescimento das organizações a nível globalizado, em uma contínua busca por consolidação no mercado atuante e a criação alianças estratégicas, que está pressionando as organizações para encontrarem novas formas de realização de seus negócios (RODRÍGUEZ-MONROY; ARTO, 2010). Uma forma de promover responsividade ao atendimento da demanda sob o *framework* VUCA é o direcionamento dos esforços no desenvolvimento de processos da cadeia de suprimentos, para a redução do tempo de atravessamento durante a mesma (SURI, 2010; TAVARES, 2019). Mediante os fatores apresentados, os ciclos de vida dos produtos estão cada vez menores e mais dinâmicos, exigindo uma gestão de projetos para melhoria de produtos e processos cada vez mais robusta (ROZENFELD *et al.*, 2006). Sendo assim, os desenvolvimentos de produto e de processos devem valer-se das boas práticas de metodologia ágil de projetos, para que seja possível entregar um protótipo com o menor tempo e custo possíveis, com o objetivo de conhecer as primeiras impressões do mercado consumidor e testes preliminares de engenharia, estratégia conhecida como Menor Valor Viável (MVP) (SUTHERLAND; SUTHERLAN, 2019).

Geralmente, os componentes e subpartes dos produtos acabados são fabricados nos estágios iniciais da cadeia de suprimento, o que torna a gestão dos departamentos e estações de trabalho fator crítico para o sucesso da organização no cenário mundial atual (SURI, 2010). Neste contexto, as atividades de usinagem, tratamentos químicos e térmicos, acabamento superficial e montagem de subconjuntos tornam-se atividades que requerem um alto monitoramento nos indicadores custo, prazo e qualidade, para a manutenção da eficiência de toda a cadeia de produção (BASTOS, 2006; SOUZA, 2011; MARTINS; NETO, 1998). Das

atividades citadas anteriormente a usinagem ganha destaque sob as demais, pois envolve uma parcela de custos relevantes tais como mão de obra direta, custos com ferramental, manutenção de máquinas, depreciação dos ativos, insumos, entre outros (NOVASKI, 1991; SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2004).

A qualidade é outro fator impactante na área de usinagem pois o nível de tolerância está cada vez mais reduzido nos projetos de componentes mecânicos e suas respectivas montagens. Diversos fatores corroboram para esta demanda, porém existem dois que merecem destaque: os encaixes e junções entre as peças, que estão cada vez menores em função da demanda de aumento de precisão, e a instalação de componentes de fixação críticos para união de juntas semipermanentes ou em estruturas (BARBOSA, 2012; GONÇALVES, 2015). Segundo Aamir *et al.* (2020a) a usinagem demanda grande porção de todos os recursos utilizados na maioria das empresas de manufatura, e na indústria aeroespacial este processo tem extrema importância em função do elevado número de peças usinadas utilizadas em todos os estágios de fabricação de uma aeronave, sugerindo que esta área da manufatura carece de um suporte mais específico.

De acordo com Machado (2011) a área de usinagem vem se desenvolvendo muito rapidamente nos últimos anos, buscando alcançar a minimização dos custos de seus processos de produção, bem como os seus respectivos subprodutos (cavacos) através de novas tecnologias, máquinas ferramentas e geometrias de corte. Para atingir estes objetivos sem prejuízo aos níveis de qualidades exigidos pelo mercado consumidor, as ferramentas utilizadas na atualidade ganham um destaque no perfil de custos deste processo. Neste ponto, o custo de usinagem também pode ser melhorado buscando maximizar a durabilidade da vida da ferramenta (MACHADO, 2011), medida que trará benefícios em relação às despesas do processo, uma vez que serão reduzidos os custos/despesas de paradas para troca de ferramentas, tempo de afiação, custos logísticos, manutenção dos estoques de insumos, entre outros (OHNO, 2015; NOVASKI, 1991).

Outro fator que pode ser considerado na redução de custo desta operação é um esforço em economia de material. Como exemplo, o alumínio é um dos metais mais utilizados em segmentos de beneficiamento, como por exemplo na área aeroespacial, e no ano de 2018 o seu mercado foi avaliado em U\$ 147,2 bilhões de dólares, sendo que, as projeções apontam um crescimento para a marca de U\$ 189,8 bilhões de dólares até o ano de 2026 (AAMIR *et al.*, 2020a). Outro fator que corrobora

o esforço é que atualmente o alumínio totaliza mais de 70% de todos os materiais empregados na produção de uma aeronave comercial (CAMPBELL JR, 2011).

Assim, mediante todos os pontos apresentados, pode-se inferir que os esforços simultâneos para a redução de custo na operação da usinagem, com foco na otimização da geometria da ferramenta de corte e na economia de material utilizado através da redução da emissão de cavacos na operação, podem contribuir com a indústria aeroespacial, proporcionando uma vantagem competitiva atraente. Desta forma, o presente trabalho busca contribuir com estado-da-arte no campo da engenharia mecânica, realizando uma investigação do desempenho de furação de alumínio no setor aeronáutico através de proposição de um novo ângulo de afiação para brocas de metal duro, com o objetivo da redução de custos e tempo de fabricação.

## 2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo promover uma contribuição à área de usinagem através da avaliação do desempenho de um novo ângulo de hélice aplicado a uma broca de metal duro, para atender uma demanda na indústria aeroespacial. Com isso, o foco da nova geometria proposta é maximizar a vida útil do insumo (broca de metal duro). O novo ângulo proposto é motivado pela redução de custos no processo de furação da liga de alumínio 7075, que é utilizada em diversos componentes da aeronave. Além disso, pretende-se entender qual é a influência de cada parâmetro de corte nos resultados obtidos, em relação aos ângulos de hélice estudados e qual a melhor combinação de parâmetros x ângulo de hélice de broca de metal duro para furação da liga de alumínio 7075.

## 3. REVISÃO DA LITERATURA

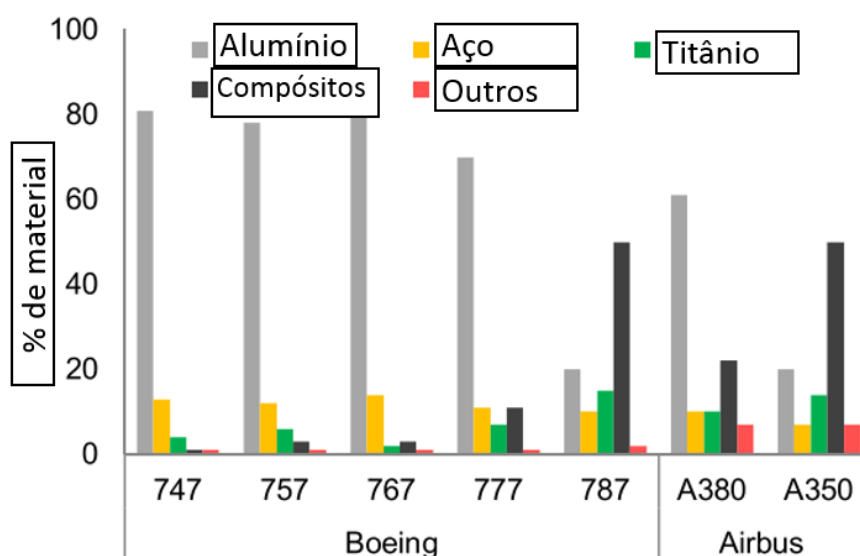
Neste capítulo, apresentam-se primeiramente as características mais relevantes do material utilizado neste estudo como corpo de prova, bem como, as suas ligas. Posteriormente é apresentado o processo de furação, assim como, as respectivas dificuldades associadas ao processo. Em um terceiro momento são apresentadas as características fundamentais das brocas helicoidais. E por fim, são apresentados os esforços computacionais utilizados atualmente para suportar o processo, para o aumento da eficiência.

### 3.1 ALUMÍNIO E SUAS LIGAS

O alumínio total utilizado em uma aeronave, tal como o Boeing 777 fabricado pela empresa Boeing equivale a aproximadamente 70% de todos os materiais empregados no processo de manufatura do produto (CAMPBELL JR, 2011). Este cenário é motivado pela vantagem econômica que o alumínio e suas ligas trazem em relação aos demais materiais e pelas características específicas de seu material (YOSHIO, 2010). Dados referentes à aplicação do alumínio no setor aeronáutico podem ser vistos na Figura 1.



Figura 1 - Materiais utilizados na fabricação das aeronaves.



Fonte: Adaptado de Aamir *et al.* (2020a).

Fazendo uma correlação entre fabricantes em uma linha de tempo de pouco mais de uma década, podemos observar o rápido avanço de outros tipos de materiais utilizados, como compósitos e titânio. A Figura 2 nos apresenta este rápido crescimento de outros materiais utilizados na fabricação da Aeronave A350-XWB.

Figura 2 - Materiais utilizados na fabricação do A350 XWB.

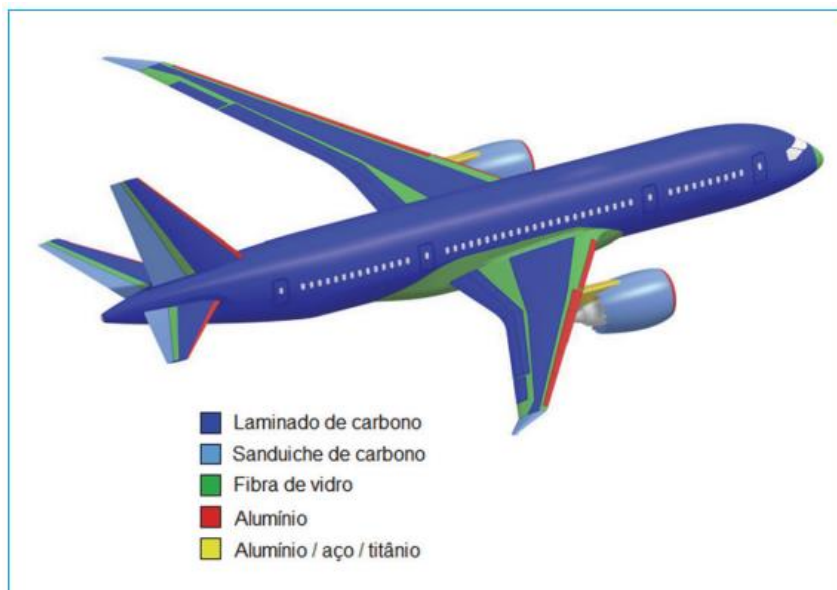


Fonte: Aviation News (2022)

Esta constante evolução de materiais aplicados na fabricação de aeronaves principalmente comerciais vem sendo aplicada para se atender vários quesitos entre

eles podemos citar: menor peso, ganho na eficiência no consumo de combustível, ausência de corrosão e excelente resistência à fadiga. A Figura 3 demonstra a aplicação e distribuição de ligas compósitas empregadas na Aeronave Boeing 787 Dreamliner.

Figura 3 - Materiais compósitos distribuídos na fabricação do Boeing 787 Dreamliner.



Fonte: Composite World (2022)

Algumas características da composição do alumínio e suas respectivas ligas levam a uma vantagem competitivo, tais como elas serão detalhadas a seguir com maiores detalhes.

- **Resistência mecânica:** devido ao alumínio possuir uma densidade inferior aos aços ele alcança uma maior relação de resistência/peso. Esta característica é explorada no mercado aeroespacial uma vez que, sendo o volume de combustível finito em uma aeronave em operação, o menor peso estrutural gera uma economia no consumo deste combustível, promovendo uma vantagem competitiva na operação de viagens aeroespaciais (DURSUN; SOUTIS, 2014);
- **Resistência à corrosão:** o alumínio possui uma característica natural de combinação de seus átomos presentes na superfície com os átomos de oxigênios presentes na atmosfera, gerando uma ligação metálica que cria uma camada de óxido protetora, impedindo a degradação do material de base. Outro ponto relevante é, que através de tratamentos térmicos específicos, o processo descrito anteriormente é

potencializado, tornando possível a aplicação do material em meios corrosivos. Como a aeronave em voo está exposta à um ambiente agressivo por várias horas, esta vantagem é amplamente explorada pela indústria aeroespacial (YOSHIO, 2010).

Como já apontando anteriormente, devido à densidade do alumínio ser inferior à densidade dos aços, e como a sua resistência à tração e compressão são elevadas, o aumento do emprego do alumínio nas asas das aeronaves cresceu exponencialmente. Este crescimento ocorreu devido ao material suportar os carregamentos de pressão que estão cada vez mais acentuados em função do tamanho das superfícies de contato das asas das aeronaves maiores (MOURITZ, 2012). Na operação de voo existe uma força de carregamento de compressão na parte superior da aeronave que é refletida na parte posterior através do peso estático da mesma, e no projeto estrutural de uma aeronave é dada atenção especial essas forças de tração e compressão (DURSUN e SOUTIS, 2014).

Devido ao surgimento de necessidades adicionais para o emprego do alumínio, foram realizados esforços para o desenvolvimento de suas ligas. Com isso, houve a necessidade de uma nomenclatura padronizada para o desenvolvimento dos estudos. Esta nomenclatura foi desenvolvida pela *The Aluminum Association Inc.*, que é uma associação de produtores de alumínio estadunidense (YOSHIO, 2010). A Tabela 1 apresenta alguns exemplos e aplicações destas ligas, onde na primeira coluna são apresentadas as séries das ligas que possuem um código de quadro dígitos. O primeiro dígito indica a série, o segundo indica as modificações na liga, enquanto o terceiro e quarto dígitos indicam a porcentagem de pureza do alumínio da liga específica da série.

Tabela 1 - Caracterização das ligas de alumínio.

Série	Principal elemento de liga	Aplicações
1XXX	Alumínio comercial puro > 99%	Possui baixo valor comercial devido à ausência de ligas. Aplicada na indústria química em ataque à corrosão e em indústrias elétricas devido à excelente condutividade elétrica.
2XXX	Cobre	Utilizada na indústria aeronáutica, porém possui um elevado nível de corrosão quando comparado as outras ligas. Porém a liga Al2024 possui uma alta aplicação na usinagem.
4XXX	Silício	Utilizada para soldar fios e ligas de alumínio, tendo a sua maior aplicação em projetos arquitetônicos.
5XXX	Magnésio	Boas características de soldagem e alta resistência à corrosão quando submetida à soldagem submersa no oceano.
6XXX	Magnésio e silício	Liga composta por proporções iguais dos dois elementos (50% cada). Possui aplicações na indústria automotiva, boa aderência aos processos de conformação, usinagem e resistência à corrosão.
7XXX	Zinco	Possui a maior resistência mecânica de todas as séries. Utilizado principalmente na indústria aeroespacial e dispositivos móveis.
8XXX	Outros elementos (incluindo lítio)	Reservada para elementos de liga diferentes daqueles usados para Al2xxx a 7xxx como ferro, níquel, liga de alumínio-lítio.

Fonte: Adaptado de Aamir *et al.* (2020a).

Como é possível observar na Tabela 1 as ligas mais utilizadas na indústria aeroespacial são as Séries 2XXX e 7XXX, e isto pode ser explicado pelas características dessas ligas:

- **Ligas da Série 2XXX:** oferecem elevada resistência a trincas por fadiga e

possuem maiores tolerância aos danos mais robustos. Por este motivo, estas ligas são aplicadas na fuselagem e nas asas menores da aeronave. Estes locais devem possuir alta tenacidade à fratura (CAMPBELL, 2008). Nesta Série, a liga Al2024-T3 merece um destaque especial, pois é o material mais empregado nas construções das fuselagens das aeronaves (VERMA; ATKINSON; KUMAR, 2001).

- **Ligas da Série 7XXX:** são ligas que adquirem maior nível de dureza através do processo de precipitação, ou seja, mediante tratamento térmico controlado em condições específicas, geralmente de solubilização e envelhecimento, onde apresentam ganhos significativos de dureza. Nesta Série, diversas ligas são amplamente utilizadas na indústria como a 7039 (blindagem), 7005 (estruturas de meios de transporte), 7016 e 7029 (componentes que exigem alto brilho, como para-choques) (YOSHIO, 2010). Nesta Série a liga 7075-T6 é altamente aplicada em componentes que sofrem carregamentos de tensão elevados, como engrenagens, fusíveis de segurança, componentes estruturais e arcos (longarinas e estabilizadores horizontais/verticais) (WILLIAMS; STARKE, 2003).

Como a Série 7XXX apresenta maior parte das aplicações dos locais críticos da aeronave, esta liga será considerada no escopo desta pesquisa. Após esta visão geral sobre a matéria prima, bem como as suas ligas, neste momento é possível direcionar a visão para o processo de furação, que será abordado na próxima seção.

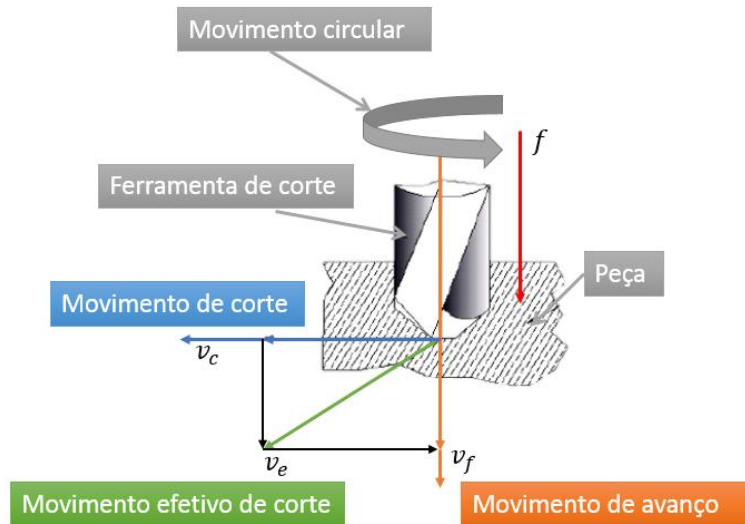
### 3.2 PROCESSO DE FURAÇÃO

A furação é um processo de usinagem definido pela norma alemã DIN 8589 (*Deutsche Industrie Normen*) como sendo um movimento rotativo de corte circular no qual a ferramenta apresenta seu avanço unidimensional em seu próprio eixo de rotação. Esta operação busca promover superfície cilíndrica circular interna em uma determinada peça (MACHADO, 2011; DIN8589-2, 2003).

No Brasil, a Norma Técnica ABNT NBR ISO 3002-1:2013 descreve a operação de furação como uma iteração entre três movimentos: movimento de corte, movimento de avanço e movimento efetivo de corte. O movimento de corte é um movimento realizado entre a ferramenta de corte e a peça, através de uma velocidade de corte ( $v_c$ ). Já o movimento de avanço potencializa este contato, através de uma iteração maior entre o conjunto peça/ferramenta de corte, mediante avanços progressivos de profundidade. Este movimento produz os cavacos e é associado a uma velocidade de avanço ( $v_f$ ). Por fim, o movimento efetivo de corte é definido pela

realização simultânea dos movimentos citados anteriormente, associado à sua respectiva velocidade efetiva de corte ( $v_f$ ) (ABNT, 2013). A Figura 4 demonstra estas interações:

Figura 4 - Cinética dos movimentos atuantes no processo de furação.



Fonte: Adaptado de Machado (2011).

Neste processo utilizam-se as seguintes Equações (1) e (2):

$$v_f = f n = f \frac{1000 v_c}{\pi D} \quad (1)$$

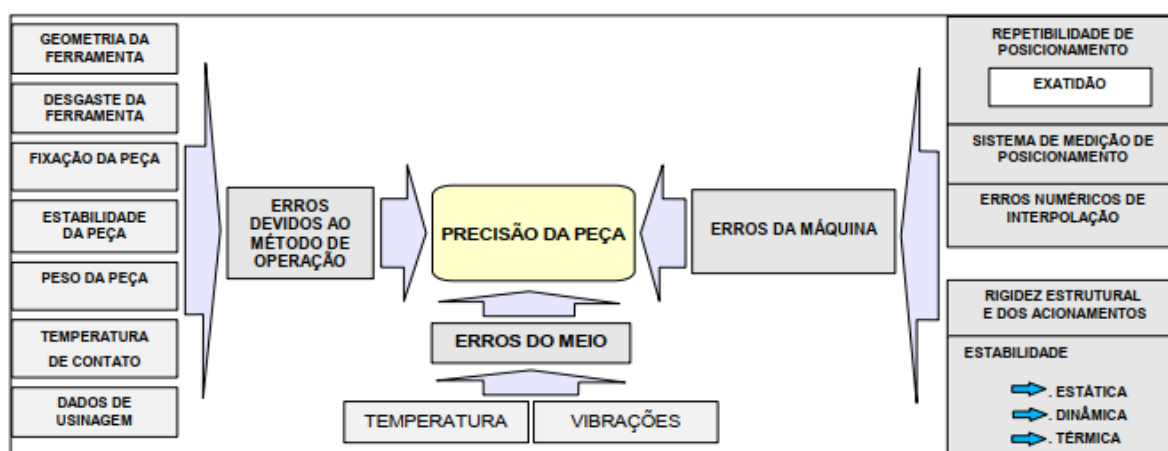
$$v_c = \frac{\pi D n}{1000} \quad (2)$$

Nessas equações,  $v_c$  é a velocidade de corte (mm/min);  $v_f$  a velocidade de avanço (mm/min);  $f$  é o avanço por volta (mm/volta);  $D$  o diâmetro da broca (mm) e  $n$  a rotação da ferramenta (RPM). Pode-se observar na Equação (1) que  $v_f$  é diretamente proporcional ao produto do avanço pela rotação da ferramenta. A Equação (2) mostra que a  $v_c$  está diretamente associada ao diâmetro da broca e a rotação da ferramenta. Além disso, a  $v_c$  também está diretamente relacionada com a vida útil da ferramenta, o material que está sendo usinado, tempo de processamento, qualidade de acabamento superficial e consumo de potência da máquina-ferramenta utilizada na operação (SOUZA, 2011).

Diversas variáveis atuam no processo de furação, impactando diretamente na

qualidade do furo bem como na vida da ferramenta de corte e máquina-ferramenta, sendo que uma série de fatores em diferentes proporções contribuem para as falhas no processo, tornando-se pontos de atenção. A Figura 5 busca demonstrar todas as iterações atuantes na furação. Analisando-a, é possível concluir que o direcionamento para um ponto único de atenção, como por exemplo, a máquina-ferramenta, não garante que erros provenientes de outros componentes do sistema não afetem diretamente a qualidade do furo.

Figura 5 - Fatores que influenciam a qualidade do furo no processo de furação.

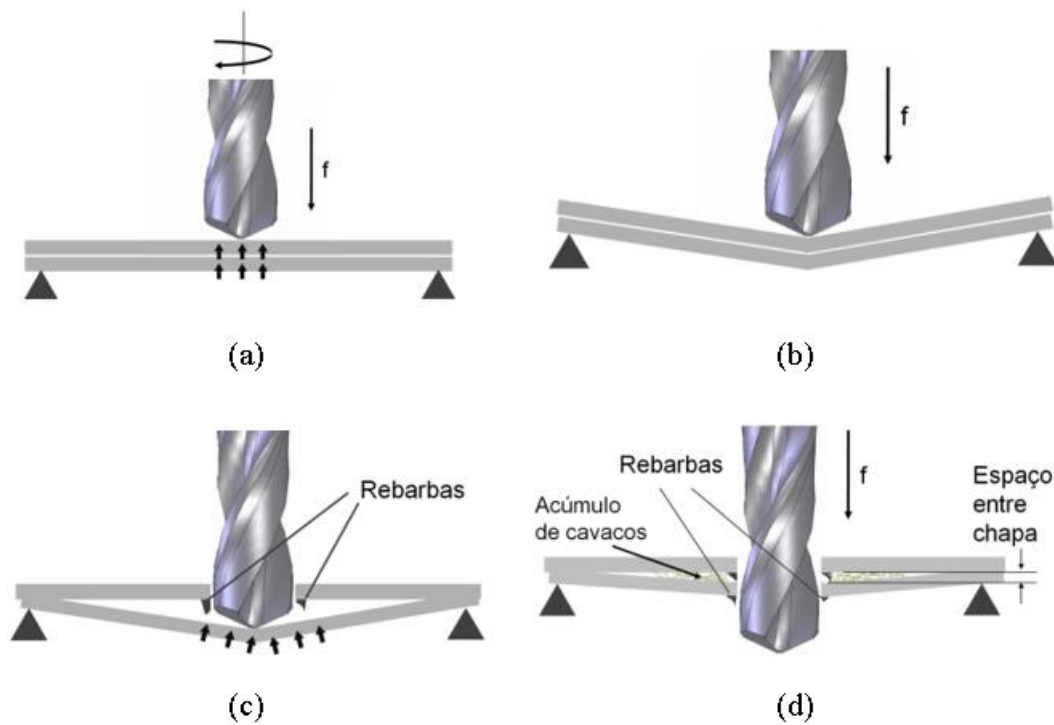


Fonte: Yoshio (2010).

Neste contexto, torna-se importante detalhar alguns erros que podem estar presentes neste tipo de sistema. Como o foco do trabalho é o desenvolvimento da geometria de corte de uma ferramenta, serão abordados apenas os erros relacionados com este tipo de dimensão, ou seja, erros geométricos.

Os principais erros associados ao processo são: erros de forma, rebarbas, erros de posicionamento de furos, erros de circularidade e erros de cilindridade (YOSHIO, 2010). O erro de forma ocorre quando a geometria do furo não é regular ao longo de seu comprimento. Este tipo de erro pode ser exemplificado por geometrias do tipo boca de sino, forma abaulada, furos côncavos, bem como eixos de furação inclinados. Em vista disso, sua magnitude pode ser determinada pela relação entre o diâmetro do furo e comprimento da furação. As rebarbas podem influenciar diretamente na resistência contra a fadiga do material devido ao zonas de acúmulo de tensão e podendo resultar no início de uma fissura no material. A Figura 6 demonstra o fenômeno da geração de rebarbas e cavacos em uma furação de duas chapas em um ambiente que simula a fuselagem de uma aeronave.

Figura 6 - Fenômeno da geração de rebarbas e cavacos em um processo de furação.



Fonte: Pinto (2010).

Na análise da Figura 6 pode-se observar que no primeiro estágio da furação a ferramenta realiza um avanço sobre a superfície a ser furada, através do vetor de  $f$  (Figura 6-a). Em segundo momento, as chapas promovem uma resistência na direção contrária à ferramenta de corte (Figura 6-b). Ao vencer a barreira exercida pela primeira chapa, a ferramenta perfura a primeira chapa, e, após a saída do primeiro furo, a primeira chapa tende a retornar ao seu estado inicial, através do regime de deformação plástica. Este retorno gera um atrito com a ferramenta, criando as rebarbas (Figura 6-c). Por fim, quando a operação inicia o contato da ferramenta com a segunda chapa, a tensão superficial na chapa é maior, pois a força não está sendo mais dividida, então a perfuração ocorre com maior facilidade e novamente quando a resistência da chapa é superada pelo vetor  $f$  há a geração de rebarbas, bem como a geração de cavacos (Figura 6-d). A má qualidade em um processo de furação afeta diretamente a precisão dimensional e a rugosidade superficial da área de contato (GIASIN; AYWAR-SOBERANIS, 2017), e o acúmulo de rebarbas pode levar à geração de custos de retrabalho não previstos, que podem promover danos inesperados para o componente da aeronave se não forem solucionados em tempo

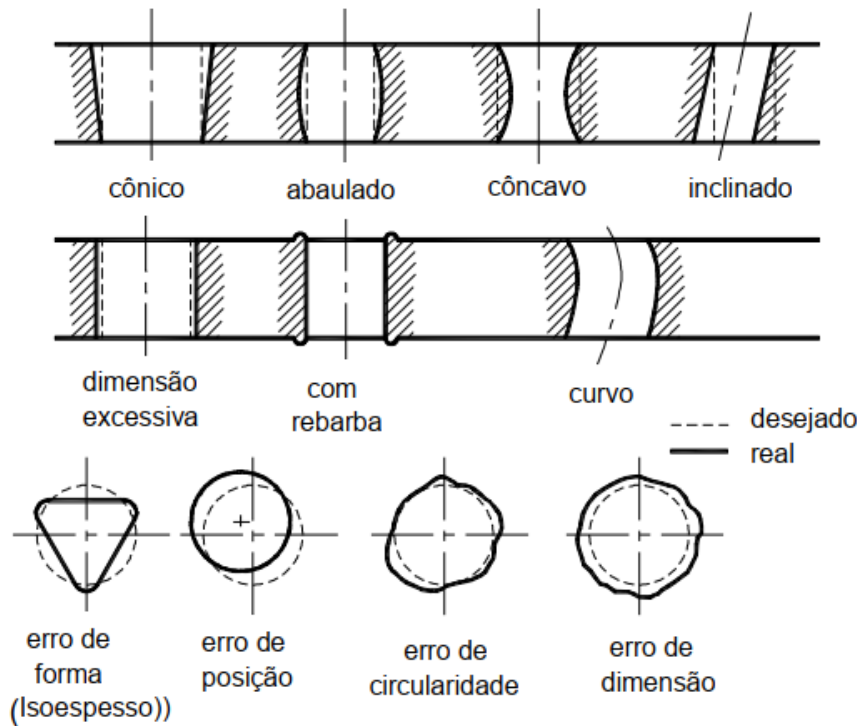


hábil (UDDIN *et al.*, 2018).

Neste contexto, torna-se evidente que para uma ferramenta de perfuração possuir um desempenho satisfatório ela deve gerar o menor percentual de rebarbas possível, uma vez que as estimativas apontam que elas representam cerca de 30% dos custos de retrabalho de componentes em alumínio de uma aeronave. (NIKNAM; B. DAVOODI; SONGMENE, 2018). Além disso, a condição da ferramenta também pode ser caracterizada como um fator crítico para a qualidade, uma vez que a afiação indevida da ferramenta, desconsiderando a sua vida útil, pode ocasionar a formação de arestas postiças não presentes na geometria original, resultando em uma possível falha de fratura da ferramenta (NOUARI *et al.*, 2003).

Erros de posicionamento do furo são falhas que ocorrem quando a origem do eixo de furação não coincide com a origem da posição prevista no projeto de furação. Com isso, o instrumental necessário para a localização dos furos, bem como a manutenção da máquina-ferramenta e dos dispositivos de auxílio para este tipo de localização tornam-se pontos críticos para a operação. Os erros de circularidade surgem quando a seção circular (contorno) de um furo é distorcida em relação à sua forma ideal. Em vista disso, são geradas formas triangulares, irregulares ou ovaladas que são comumente observadas na furação. Fatores que contribuem diretamente para este tipo de erro são a precisão do eixo-árvore da máquina, a afiação da ferramenta e a rigidez do equipamento. Já os erros de cilindridade ocorrem quando alguma parede do furo possui uma dimensão maior ou menor do que especificado no projeto. Para uma melhor percepção das possíveis geometrias geradas através dos erros abordados é apresentada a Figura 7.

Figura 7 - Geometrias associadas aos erros do processo de furação.



Fonte: König (1981).

Mediante, todos os fatos apresentados, é possível concluir que as indústrias de manufatura que utilizam a operação de furação estão sujeitas às variações inerentes ao processo, pois a falta de qualidade no processo pode prejudicar os lucros da operação através de retrabalhos inesperados (AAMIR *et al.*, 2020a). Por fim, é possível concluir que pelo tamanho do desafio enfrentado na usinagem por furação, buscando atender os indicadores de desempenho: preço, prazo e qualidade, possui grande relevância no campo acadêmico, necessitando de mais pesquisas, como este trabalho, para a melhoria da qualidade na operação de furação (SINMAZÇELIK *et al.*, 2011).

### 3.2.1 Processo de furação na indústria aeroespacial

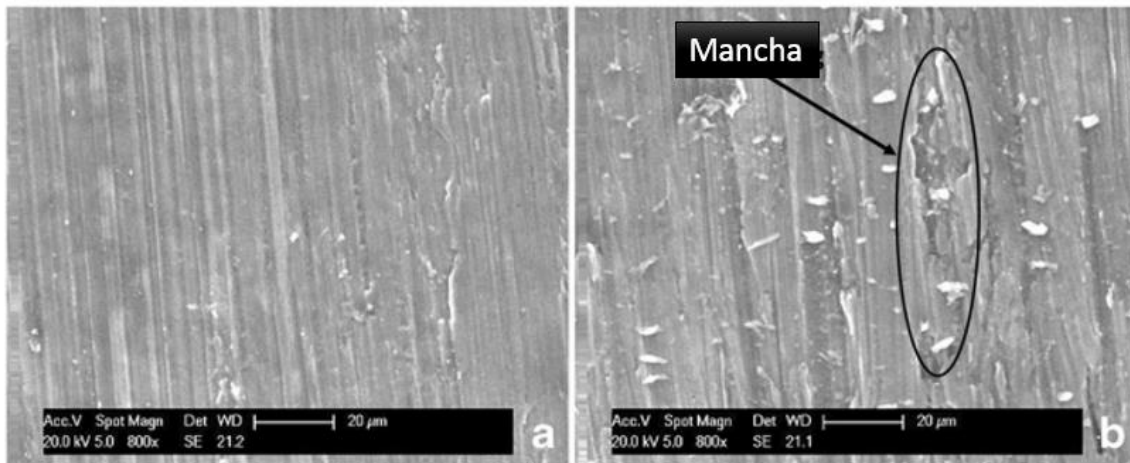
A operação de furação na indústria aeroespacial pode ser considerada como sendo o processo de usinagem mais relevante, devido ao número elevado de furos que devem ser realizados nas diversas etapas de confecção de uma aeronave. Este índice é mais acentuado em conjuntos que necessitam de juntas parafusadas e juntas fixas por rebites (AAMIR *et al.*, 2020a). Estes tipos de estruturas, geralmente estão alocadas em posições críticas da aeronave, e com isso sofrem constantes choques e vibrações que podem ocasionar falhas por fadiga, em função do carregamento cíclico acima do limite de escoamento do material. Neste contexto as falhas por fadiga constituem 56% das falhas registradas nas aeronaves em serviço, enquanto o segundo maior tipo de falha é a corrosão, representando cerca de 16% (SUNI *et al.*, 2018). A maior incidência de falhas na furação ocorre pela presença de erros de cilindricidade, onde o acúmulo das tensões residuais superficiais afeta fortemente o diâmetro da entrada da furação. Porém, dependendo a intensidade deste campo de tensões a saída da furação também pode ser afetada (ELAJRAMI; BERENGUEDIAB; RONALD, 2009).

Um dos fatores que corroboram para este elevado índice de falhas é que a maioria dos furos em uma aeronave são realizados de forma manual, através de máquinas-ferramentas pneumáticas. Segundo Suni *et al.* (2018) esta predominância ocorre em função do difícil acesso à certas regiões da aeronave, onde não é possível transportar uma máquina automática para a realização das furações devido a restrição do layout interno da estrutura e a segurança dos demais colaboradores envolvidos nas operações adjacentes. Gu *et al.* (2009) afirma que em função desta restrição de layout a dissipação do calor gerado pelo contato da ferramenta de corte com o material também se torna restrita, levando ao desencadeamento de alguns eventos sequenciais como o aquecimento da superfície, aumento da rugosidade superficial e concentração de regiões com acúmulo de tensões.

Este acúmulo de tensões superficiais gera trincas, que possuem uma grande chance de se propagar devido a tenacidade à fratura afetada naquela região, impactando diretamente na vida útil do componente exposto ao quadro apresentado (LIU *et al.*, 2010). Além disso, as tensões podem alterar a rugosidade superficial de forma que cause o aparecimento de certas manchas na superfície da peça. Estas manchas são geradas pelo processo de fratura ou lascamento superficial, devido à

interação da quebra destas tensões e a criação de pequenas partículas de dureza elevada, vindas da ferramenta de corte (LI *et al.*, 2017). A indústria aeronáutica não aceita este tipo de mancha superficial em seus componentes, pois ela não permite a visibilidade de rachaduras e trincas que podem localizar-se abaixo da mancha. A mancha superficial (Figura 8 - b) criada pelo processo de usinagem promove a quebra de borda de corte periférica da ferramenta, levando ao corte irregular e a criação de manchas simultaneamente (LI *et al.*, 2017).

Figura 8 - Processo de criação de manchas superficiais: a) antes da usinagem e b) após a usinagem.

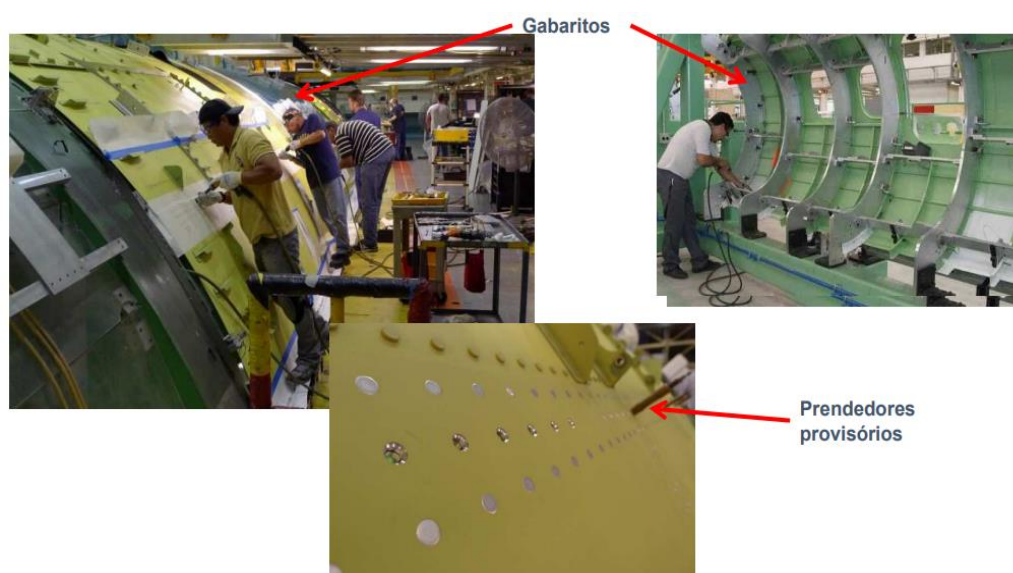


Fonte: Adaptado de Li *et al.* (2017).

Outro ponto crítico no processo de furação da indústria aeronáutica é relativo às matérias primas. O material mais empregado nas fuselagens e nas asas de uma aeronave é a liga de alumínio AA2024-T3 alclad, tendo em sua composição básica Alumínio (Al), Cobre (Cu) e Manganês (Mn). Já as características mecânicas de resistência à tração mínima e de resistência ao escoamento em 0,2% de compensação são 421 MPa e 276 MPa, respectivamente (CUNHA; LIMA, 2017). O alclad, ou camada de revestimento de alumínio, é uma camada fina de alumínio puro (mínimo de 99,3% em peso) representando 2,5% da espessura total em cada de cada face da superfície do componente. Esta camada é criada para promover resistência à corrosão. Com isso, qualquer risco superficial que represente uma profundidade superior à 2,5% da espessura compromete a vida útil do componente (CUNHA; LIMA, 2017).

Sendo assim, existem diversas normas e rigorosos requisitos de qualidade que regem o processo de furação na indústria aeronáutica (GIASIN; AYWAR-SOBERANIS, 2017). Para superar algumas das dificuldades apresentadas, são utilizados gabaritos para posicionamento dos componentes dos conjuntos a serem furados, fixação destes conjuntos, localização exata da furação e a realização da furação perpendicular à superfície e sem vibração (HU *et al.*, 2015). Para melhor compreensão do processo, a Figura 9 apresenta o processo de fixação dos componentes nos gabaritos e o processo de furação manual (BORRILE; FARIA, 2010).

Figura 9 - Processo de furação manual na indústria aeroespacial.



Fonte: Borrile e Faria (2010)

Como é possível observar na Figura 9, os gabaritos de perfuração ajudam a posicionar o conjunto a ser perfurado no ponto de perfuração correto da estrutura, mantendo os orifícios de conexão normalizados para a montagem. Mediante todas as dificuldades apresentadas, nos últimos anos esforços vêm sendo realizados para a produção de componentes menores, para que o processo de furação seja realizado em máquinas de Controle Numérico Computadorizado (CNC). Esta iniciativa é direcionada para a manutenção da qualidade exigida, produtividade, repetibilidade e padronização do processo (AAMIR *et al.*, 2020a).

Então, neste ponto pode-se inferir que vida útil destes componentes é diretamente afetada pelas propriedades de seu material, bem como a ferramenta de

cutting employed in the machining process and the process used for the drilling of holes in components (NASA, 2004).

### **3.2.2 Processo de furação automatizado na indústria aeroespacial**

The precision drilling used in this type of industry can be performed in two ways: single pass or step drilling. In the first alternative, generally the drilling is performed without lubrication, being able to reach tolerances tighter than the ISO IT11 – IT14 standards and surface finish around 1,6  $\mu\text{m}$  Ra (Average Arithmetic Roughness). In view of this, this type of operation is performed in structural assemblies that require interference in the installations of pins, being able to reach  $\pm 25 \mu\text{m}$  for aluminum alloys and  $\pm 24 \mu\text{m}$  for titanium alloys (CONTRUCCI, 2012).

Already in step drilling, several holes are performed in the same position, starting from a smaller diameter, performing several passes through intermediate diameters of drills, until reaching the value closest to the final diameter provided in the project, through another cutting tool known as reamer. Obviously that the precision is achieved in a slower and more expensive way than in the first (single pass), due to the change of tools (drills and reamers) and their respective applications (AMORIM, 2002).

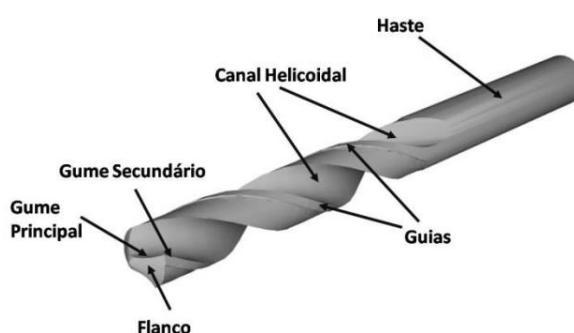
Through the technological evolution reached in the last years the efforts for the development of new geometries of cutting tools, new materials and more efficient machine tools have promoted the use of CNC machines for this purpose. This initiative promoted attractive gains for machining operations, where the costs with the cycle time, inputs and depreciation of assets were reduced (STORETEAU, 2007).

### **3.2.3 Brocas Helicoidais**

As helical drills, besides performing the drilling with precision, they must act on the removal of chips in a agile way, to avoid the wear of the tool with the internal walls of the material that is being machined. This wear promotes an accumulation of local stresses, which can cause the breakage of the tool (SOUZA, 2011). In this context, the geometry of helical drills can be generalized for two main components: the body, which has a necessary shaft for the

fixação na máquina-ferramenta e os canais sulcados com geometria helicoidal que envolvem todo o núcleo da ferramenta. No segundo componente está localizada a ponta da broca, onde estão presentes a geometria especificada em projeto e o ângulo de corte, que são as geometrias de maior importância em todo o conjunto pois determinam o corte da ferramenta (PINTO, 2010). A Figura 10 ilustra as partes fundamentais de uma broca helicoidal.

Figura 10 - Geometrias fundamentais de uma broca helicoidal.

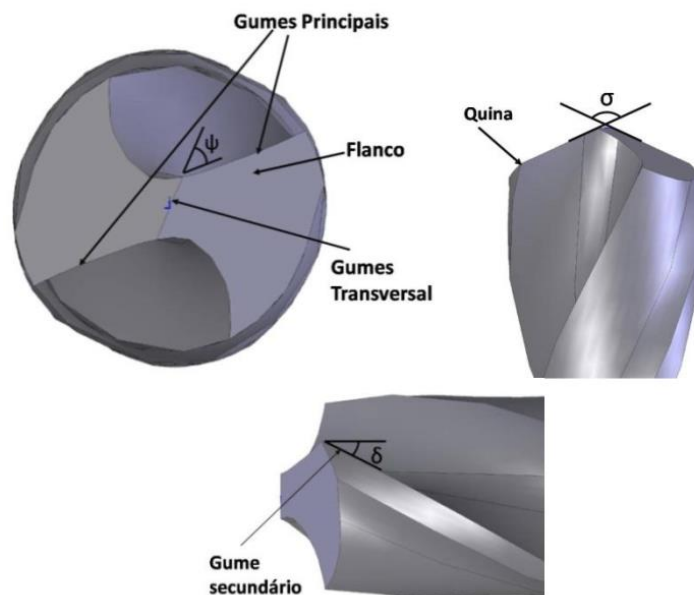


Fonte: Pinto (2010).

Outras geometrias que estão presentes no segundo componente são:

- **Gumes principais:** são gerados através do encontro das faces da ferramenta com o flanco primário (Figura 11). Os gumes principais devem estar deslocados entre si para proporcionar uma obliquidade na formação de cavaco, gerando melhores condições de corte (STREAMMER, 2005).
- **Gumes secundários:** são gerados pelo encontro das faces da ferramenta e o flanco secundário (Figura 11). Este gume estende-se ao longo de toda ferramenta e é responsável pela qualidade da parede do furo (MACHADO, 2011).
- **Gume transversal:** oposto aos ângulos dos gumes principais, estes gumes possuem ângulo estritamente negativos ( $\Psi$ ). Esta condição não favorece a ação cortante da superfície, levando apenas ao esmagamento do material na região de contato. Mediante isso, ao longo dos anos estão sendo realizados esforços para o encontro da afiação que atenua esta condição, favorecendo o corte (PINTO, 2010).

Figura 11 - Geometrias fundamentais da ponta da broca helicoidal.



Fonte: Pinto (2010).

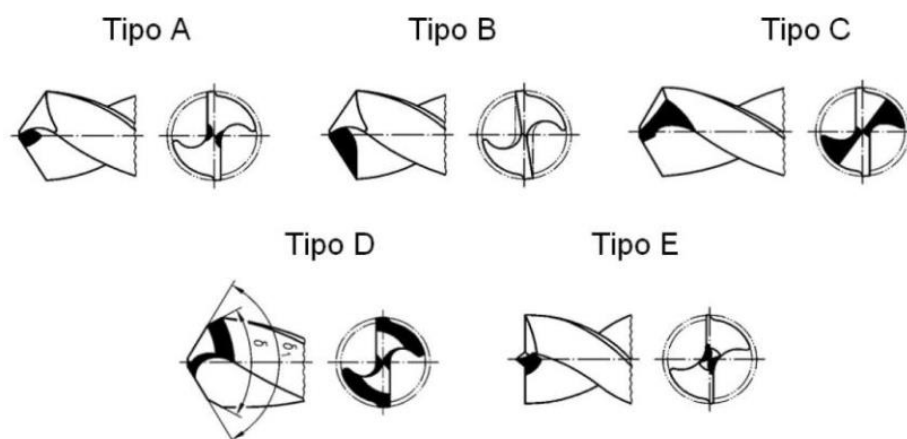
- **Superfícies de saída:** conhecida também por face da broca, estende-se ao longo de todo o seu comprimento. Esta superfície possui um ângulo  $\gamma$  que é variável ao longo do gume transversal, podendo atingir valores que variam no intervalo  $\{-\infty, 0\}$  (PINTO, 2010).
- **Ângulo de hélice:** é um ângulo relacionado diretamente com o ângulo de saída da ferramenta. Estes ângulos são responsáveis pela remoção do cavaco para a superfície oposta à superfície de entrada da broca, e em função disso são diretamente responsáveis pela intensidade das forças de corte (BOEIRA, 2010).
- **Flanco:** também conhecida como superfície de incidência, pode apresentar o ângulo variável ao longo do gume principal, sendo interessante que o ângulo seja maior na quina da broca. Porém, este ângulo é crítico pois pequenas varrições em seu valor podem proporcionar maior atrito entre a ferramenta de corte e a superfície da peça, gerando um aumento de temperatura e prejudicando a qualidade da furação (CASTILLO, 2005).
- **Núcleo:** responsável pela rigidez da ferramenta durante a operação. A sua dimensão aumenta em aproximadamente em 10% do diâmetro inicial (ponta da broca) até o corpo. Esta expansão dimensional é pensada no número de afiações que a ferramenta pode ter (PINTO, 2010).



- **Ângulo de ponta:** a sua variação permite a alteração da espessura do cavaco, em função da variação do comprimento da parte ativa dos gumes principais. Este ângulo exerce uma influência direta sob o ângulo de quina, podendo fragilizar ou fortalecer esta região (MACHADO, 2011).

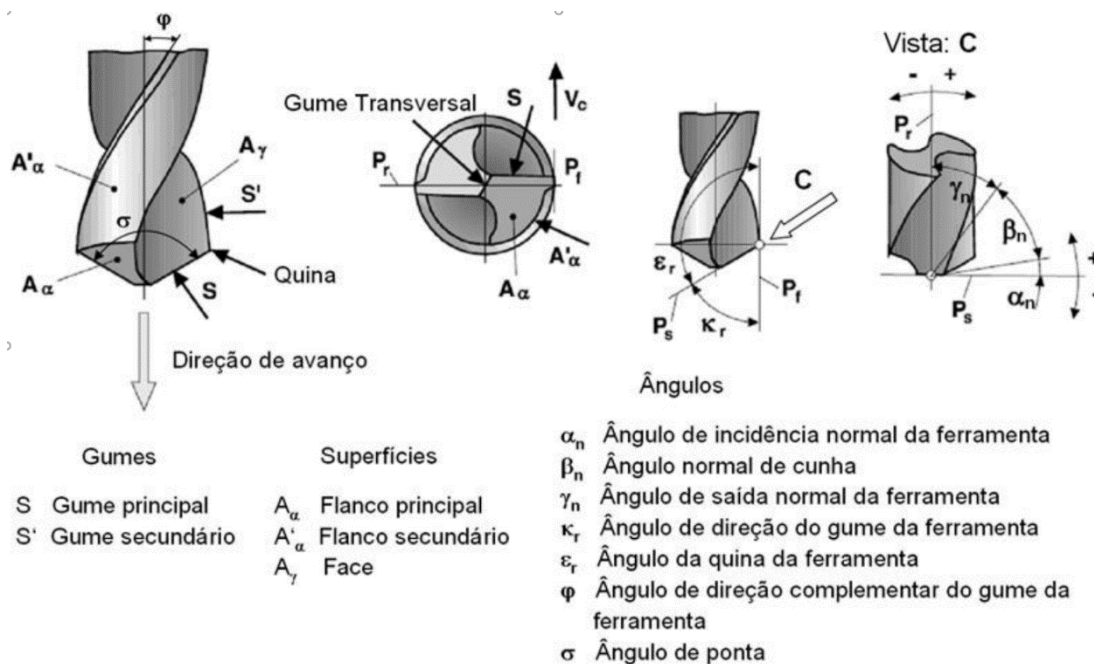
A Figura 12 ilustra tipos de geometrias para suavização do efeito do gume transversal, e a Figura 13 contém os principais ângulos de uma broca helicoidal.

Figura 12 - Geometrias de afiação para a suavização do efeito do gume transversal.



Fonte: Boeira *et al.* (2009).

Figura 13 - Principais ângulos e superfícies em uma broca helicoidal.



Fonte: Boeira *et al.* (2009).

Dois pontos relevantes que devem ser levados em consideração no dimensionamento destas geometrias são o desgaste na operação e a vida útil da broca. O desgaste ocorre por diversos fatores, porém a causa mais comum é o atrito do cavaco com a superfície de saída. Este atrito gera um carregamento térmico que não consegue dissipar-se em certas zonas de corte, gerando um desgaste na ponta da ferramenta. Este desgaste pode ser propagado para os gumes e flancos, afetando a qualidade da furação (SOUZA, 2011).

Já a vida útil da broca helicoidal é dada basicamente tempo total efetivo de trabalho (deduzidos todos os tempos passivos) em que a ferramenta atuou até perder o seu corte. O aumento do torque na operação da furação sem a solicitação da máquina ferramenta altera o acabamento superficial do furo e é um indicativo de desgaste crítico da ferramenta, podendo ocasionar o lascamento da ferramenta ou destruição total da aresta de corte. Em vista disso, a utilização da broca até este ponto não é recomendada, pois haverá um esforço na afiação da broca para o retorno próximo da geometria anterior ao desgaste, o que não agregará valor ao processo (CASTILLO, 2005).

Os fatores que mais contribuem para o desgaste e, posteriormente, a vida útil da ferramenta em ordem de importância são: velocidade de corte, avanço e profundidade de corte, sendo a velocidade de corte o parâmetro mais crítico. Neste ponto, um dano na broca provocado pelo aumento em 10% na velocidade de corte é estritamente maior que o dano provocado pelo aumento do avanço na mesma proporção (KENNEDY, 2009).

Outro ponto que deve ser considerado na vida útil da ferramenta é que no trabalho efetivo de usinagem a energia que é dissipada pelo atrito da ferramenta de corte com o material pode atingir níveis significativos, alterando a geometria atômica da composição do material da ferramenta, e conseqüentemente, a sua geometria física em função da variação da resistência e tenacidade à fratura. O alcance deste ponto é um indicativo claro de que a ferramenta deve ser afiada novamente ou substituída (CAMPOS, 2004).

### **3.2.4 Esforços tecnológicos para o desenvolvimento do processo de furação**

No estudo de Parenti, Pagani e Annoni (2019) foi proposta uma ferramenta de Inteligência Artificial (do inglês, *Artificial Intelligence*, AI) que utiliza algoritmos de processamentos de imagens para a detecção de danos gerados nas paredes do furo e na ferramenta, durante o processo de furação. Todas as imagens processadas foram obtidas por microscopia óptica, e a iniciativa do trabalho possuía como foco o monitoramento de falhas na geometria da ferramenta devido ao desgaste. A abordagem é baseada em uma segmentação de perfil, que explora um algoritmo de detecção de borda seguido por um método de extração de contornos baseado na solução de uma equação diferencial parcial. Esta abordagem foi validada com um plano fatorial envolvendo furos de 1,6 mm de diâmetro, gerados com diferentes parâmetros de corte e ferramentas em carboneto de tungstênio, revestidas com diamante.

O método proposto no trabalho atingiu a detecção do lascamento da broca em uma amplitude de 10 $\mu$ m à 50  $\mu$ m. Esta nova faixa de amplitude em uma escala tão baixa, promoveu um avanço tecnológico ao setor (PARENTI; PAGANI; ANNONI, 2019). Outra constatação obtida pelo trabalho é que a extensão do defeito de lascamento e tendência de saliências na geometria da ferramenta não pode ser justificada pelos parâmetros de corte testados.

Já no trabalho de Aamir *et al.* (2020c) foi utilizada uma Rede Neural Artificial (do inglês, *Artificial Neural Network*, ANN) para avaliar o desempenho de brocas revestidas de metal duro em comparação com brocas sem este revestimento na usinagem da liga de alumínio Al 2024. Esta análise de desempenho foi realizada em um ambiente de múltiplos furos simultâneos, com o objetivo de redução de custos e aumento da produtividade. Os resultados observados mostraram que as brocas sem revestimento geraram uma quantidade menor de rebarbas e uma melhor rugosidade superficial quando os parâmetros de rotação eram baixos. Porém, quando estes parâmetros foram alterados para velocidades superiores, o quadro se inverteu. Este fenômeno foi explicado pelo fato de que o revestimento promove alto valor de dureza e baixo coeficiente de atrito, gerando melhor qualidade superficial. Com isso, os autores concluem que é a utilização de brocas revestidas com titânio em ambientes de múltiplas furações simultaneamente é viável quando os parâmetros de avanço e velocidade de corte são altos, e que o modelo de ANN proposto possui um erro muito pequeno quando os dados do treino são próximos do cenário real que está sendo avaliado, e pode ser estendido para a previsão do diâmetro do furo e erros de circularidade neste tipo de processo.

Belaadi *et al.* (2020) realizaram uma análise de sensibilidade da influência da variação dos parâmetros de corte em diversos cenários. O objetivo dos experimentos foi observar esta influência no processo de delaminação ao perfurar materiais biocompósitos de matriz de epóxi reforçada com tecidos de junta. Para o planejamento dos experimentos, foi utilizada a técnica estatística Aplicação de Análise de Variância (do inglês, *Application Analysis of Variance*, ANOVA). Já na metodologia do trabalho, duas técnicas foram avaliadas: Metodologia da Superfície de Resposta (do inglês, *Response Surface Methodology*, RSM) e ANN. Os resultados apontaram que no processo de previsão do desempenho das furações a ANN teve sempre o desempenho superior ao da RSM em todos os cenários avaliados. Para tal análise foi criada uma função objetivo para ser alcançada em cada cenário, e então foram aplicadas as metodologias simultaneamente; posteriormente, foram feitos ensaios reais para confrontar os resultados obtidos pelos modelos.

Uma abordagem de otimização foi proposta por Rico-Garcia, Sanchez-Romero e Gomis (2020), buscando otimizar o tempo de deslocamento da ferramenta em um dado mapa de furações em uma peça. Para tal, uma determinada situação foi modelada utilizando estrutura do clássico problema de otimização, conhecido como

Problema do Caixeiro Viajante (do inglês, *Traveling Salesman Problem*, TSP). Neste trabalho, cada centro do furo localizado no mapa foi considerado como um nó a ser percorrido na rota do TSP. Como já é de conhecimento da literatura, este tipo de problema é extremamente complexo de ser solucionado, devido a sua complexidade polinomial, gerada pela dimensão do seu espaço amostral. Para solucionar esta questão, os autores propuseram um método de solução de Otimização de Aprendizado de Máquina que foi implementado seguindo a arquitetura paralela, e resolvido em uma Estação de Processamento Gráfico (do inglês, *Graphical Processing Unit*, GPU). Com isso, os resultados foram obtidos em um tempo nove vezes menores, comparados a uma estratégia de implementação sequencial.

Por fim, no trabalho de Sreenivasulu, Raob e Ravindra (2020) foram desenvolvidos modelos matemáticos analíticos para o dimensionamento da força de empuxo, do torque e do tamanho da rebarba com ângulo de afastamento variável da geometria da broca. Este estudo foi concentrado em ligas de alumínio usadas para aplicações automotivas, Al 6061, Al 2014 e Al 7075. Através de ensaios físicos, os autores puderam avaliar os desempenhos dos modelos, sendo observado que os valores obtidos de força de empuxo e os tamanhos das rebarbas nos ensaios reais, são superiores aos valores obtidos no modelo analítico, quando o ângulo de incidência é perturbado. Outro ponto relevante que pode ser observado é que a altura de início da rebarba é diretamente proporcional à força de empuxo, e os autores concluíram que a intensidade da força de empuxo está intrinsecamente relacionada com a altura da rebarba. Como última conclusão obtida, foi observado que um incremento no ângulo de saída da broca produz valores mais baixos de força de empuxo e reduz a potência necessária na perfuração, bem como minimiza o custo de perfuração. Para folga menor, ângulos correspondentes a um aumento nos valores das velocidades de avanço produzem um aumento nos valores da força de empuxo.

Com isso, pode-se observar que os esforços nas utilizações das ferramentas da Indústria 4.0, como IA, RNA e Modelos de Otimização estão contribuindo para o avanço tecnológico da usinagem por furação, o que também evidencia a contribuição do trabalho no campo de pesquisa, bem como aponta uma lacuna que pode ser preenchida através de trabalhos futuros. As inovações tecnológicas presentes no mercado aeroespacial na atividade de furação de precisão estão convergindo para a utilização das ferramentas disponíveis na I4.0, aliadas aos esforços para o desenvolvimento de novas geometrias, afiações e máquinas-ferramenta. Como o

38

escopo desta pesquisa é o desenvolvimento de uma nova geometria de broca helicoidal para economia de custos no processo de furação, este trabalho está convergindo diretamente para o preenchimento dessas lacunas.

## Materiais e métodos

Os ensaios foram realizados em um Centro de Usinagem Vertical ROMI, modelo D800, em uma empresa do setor Metal Mecânico da cidade de Jaú-SP. O processo específico analisado trata-se da furação em corpos de prova (CDPs) de alumínio 7475. Por meio de análises das furações que foram realizadas pela medição dos diâmetros dos furos, do desgaste gerado nas brocas e acabamento superficial dos furos, é possível entender qual a influência do ângulo de hélice influencia na qualidade do furo e no rendimento da ferramenta.

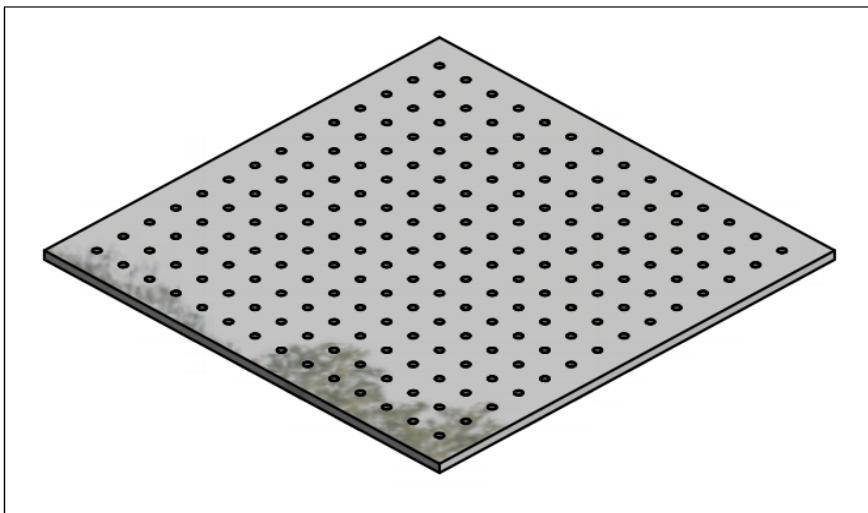
Para execução dos experimentos foi efetuada uma combinação de 12 ensaios. Foram aplicadas velocidades de corte ( $v_c$ ) de 80 m/min e 110 m/min, ambas combinadas com o avanço ( $f$ ) de 0,08 mm/rot. Para ambos os parâmetros a profundidade do furo foi de 6,35 mm, sendo todos os furos passantes. Na furação foi utilizado o processo direto (sem furo de centro), pois a broca já possui geometria de frontal auto-centrante, o que dispensa o uso de uma broca de centro e, conseqüentemente, o processo de escalonamento de furo (pica-pau).

O processo de furação foi realizado com brocas inteiriças em metal duro, sem revestimento, com dupla hélice ao centro da guia, canal polido e sem refrigeração interna. No primeiro ensaio foram feitos 49 furos utilizando uma broca com ângulo de hélice de  $30^\circ$  e diâmetro ( $\emptyset$ ) de corte igual a 4,762 mm. Após as furações, a ferramenta foi tirada para análise visual primária de todos os furos e do desgaste apresentado para cada  $v_c$  utilizada nos testes. Para o segundo ensaio, outros 49 furos foram realizados utilizando uma broca com ângulo de hélice de  $20^\circ$  e  $\emptyset$  de corte igual a 4,762 mm. Após as furações, a ferramenta foi retirada para análise visual primária de todos os furos e do desgaste apresentado para cada uma das velocidades de corte. Este mesmo procedimento foi realizado também para o ensaio 03, agora com broca com ângulo de hélice de  $40^\circ$  e  $\emptyset$  de corte igual a 4,762 mm. Para os três ângulos utilizados na realização dos testes, foram utilizadas as duas  $v_c$  citadas acima (80 e 110 m/min), com réplica para ambas, e o mesmo avanço para todos as furações, totalizando 12 ensaios. Assim, foi obtido uma amostragem de 588 furos usinados para realização das análises da pesquisa, totalizando 37338 m de comprimento linear de furação.

#### 4.1 CORPOS DE PROVA

Como corpo de prova (CDP) de furação, foi utilizado um bloco de alumínio aeronáutico 7475. Os furos passantes foram usinados (furados) de forma linear, ou seja, em forma de linha. Foi analisada a condição da ferramenta a cada 14 furos, ou seja, em cada linha de furação até que fossem obtidos os 49 furos propostos para cada ensaio. Durante os ensaios foram utilizados 3 CDPs, onde foram realizados os 12 ensaios, sendo 4 por CDP. Em cada CDP foram testadas duas velocidades de corte com o mesmo avanço. Para cada velocidade utilizada foi feita uma réplica para constatação do resultado obtido. A Figura 14 e a Figura 15 apresentam o CDP com as características dimensionais das furações descritas para os experimentos.

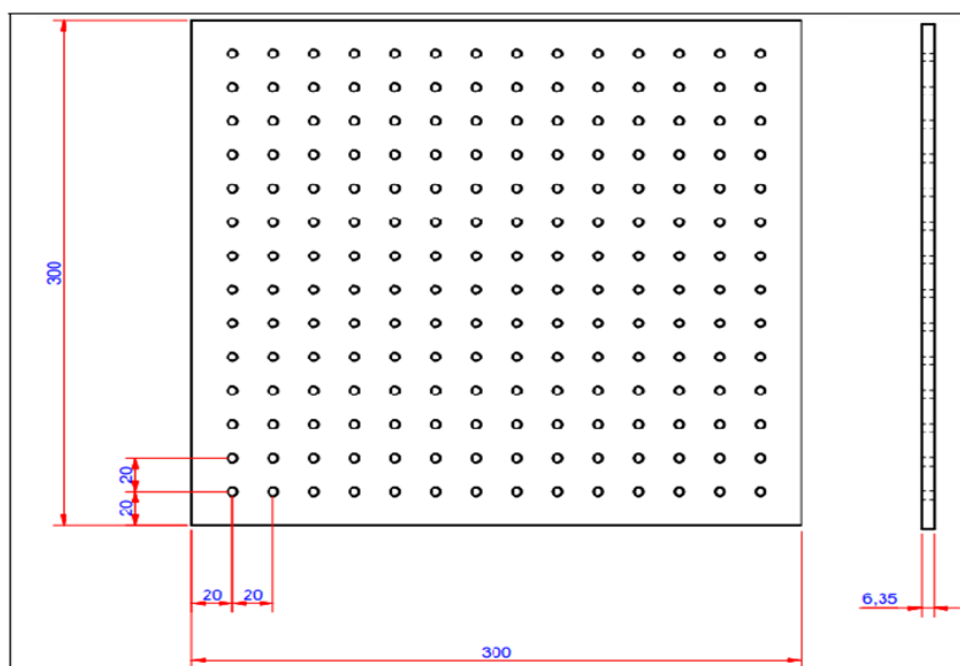
Figura 14 – Corpo de prova em perspectiva.



Fonte: O Autor



Figura 15 – Vista frontal do corpo de prova (dimensões em mm).

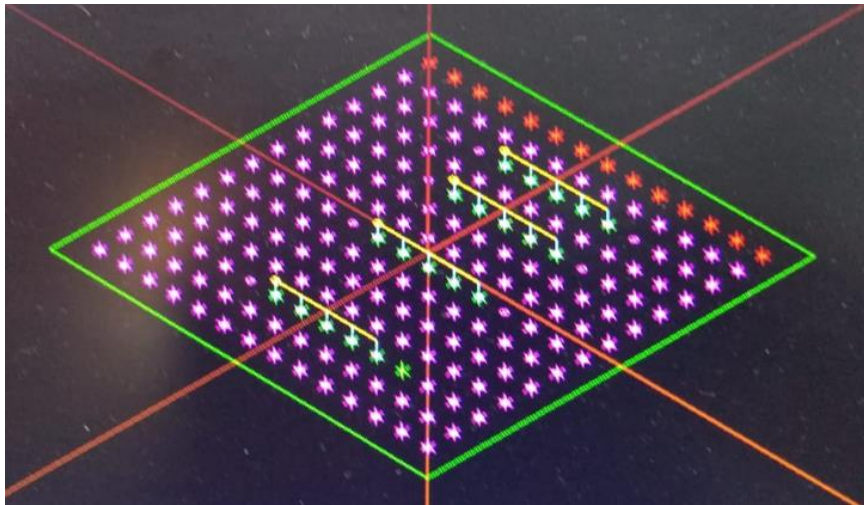


Fonte: O Autor

### 4.3 DISPOSIÇÃO DE FURAÇÃO NO CDP

Na Figura 16 podemos observar a disposição espectral de furação para cada CDP gerado pelo programa de furação que faz interface com o Centro de Usinagem programa-se este amplamente utilizado no setor metal mecânico denominado CAD CAM. Ao centro do CDP podemos observar a também devidamente destacadas em “verde” os pontos de coleta do programa ARDUINO, programa este que foi utilizado para capturar e identificar as vibrações para cada parâmetro de corte utilizado. Para cada CDP foram utilizados 4 pontos de coleta de dados por amostragem sendo 5 furos cada ponto de coleta, totalizando 20 furos de coleta de dados por CDP.

Figura 16 - Amostra espectral da furação gerado pelo CAD CAM.



Fonte: O Autor

#### 4.4 MÁQUINA-FERRAMENTA

A máquina-ferramenta utilizada para a realização dos ensaios de furação foi um Centro de Usinagem Vertical em 3-eixos da marca ROMI, modelo D800, com comando personalizado pelo fabricante da máquina, magazine de ferramentas com capacidade para 30 ferramentas, com os movimentos de translação X, Y realizados pela mesa e o movimento Z realizado pelo fuso. As principais características técnicas deste Centro de Usinagem estão listadas na Figura 17.

Figura 17 - Características Técnicas – ROMI modelo D800



Fonte: O Autor

#### 4.5 FERRAMENTAS DE CORTE

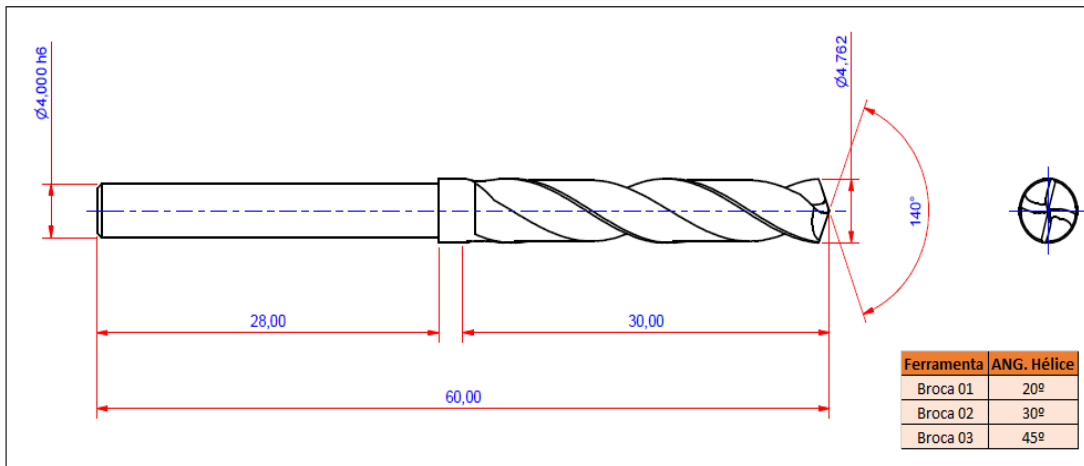
Nos ensaios foram utilizadas brocas inteiriças de metal duro de canal helicoidal, sem cobertura, canal polido, dupla guia ao centro da hélice e sem refrigeração interna, com duas arestas de corte, de diâmetro igual a 4,762 mm na ponta e haste com diâmetro de 4 mm. Elas foram fabricadas pela empresa NIPPONTEC, especializada em fabricação de ferramentas rotativas cilíndricas para o setor Aeroespacial localizada em Bragança Paulista – SP. O metal duro utilizado na fabricação das ferramentas foi o K40UF, originário da empresa alemã *Konrad Friedrichs*. Foram fabricadas 3 ferramentas de corte, sendo que cada broca apresenta um ângulo de hélice diferente em relação às outras (Figura 18 e Figura 19). O restante das condições geométricas de corte e dimensionais foram as mesmas para todas as ferramentas.

Figura 18 – Dimensões (em mm) das ferramentas utilizadas nos ensaios.



Fonte: O Autor

Figura 19 - Dimensões (em mm) das ferramentas utilizadas nos ensaios.



Fonte: O Autor

Na Tabela 2 encontram-se as demais características geométricas fundamentais utilizadas no projeto das ferramentas.

Tabela 2 - Características Geométricas de Fabricação das brocas.

Características geométricas de fabricação	Medidas
Espessura do núcleo	$\varnothing 1,92 \text{ mm}$
Cônico do núcleo	0 -0,03
Cônico inverso	0,142 ~0,164
Largura das guias	0,45~0,55

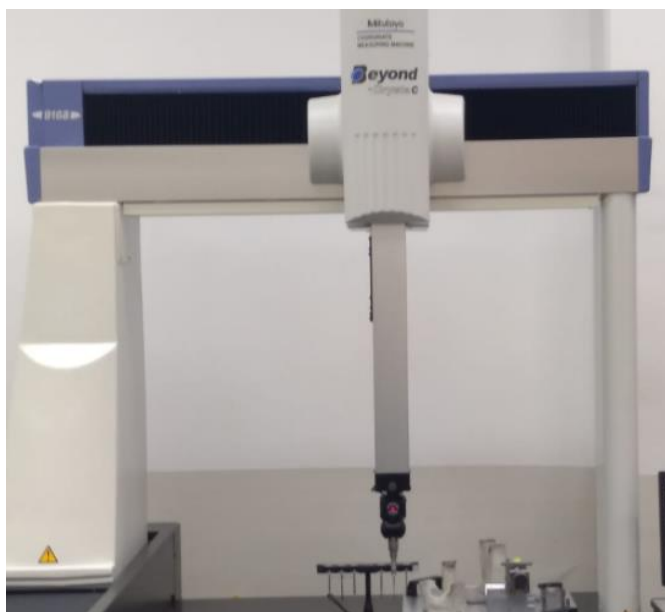
Fonte: O Autor

#### 4.6 MEDIÇÃO DO DIÂMETRO DOS FUROS

As medições dos furos foram realizadas por meio de uma máquina de medição Tridimensional Referenciada em nos eixos X, Y e Z, do fabricante Mitutoyo (Figura 20) modelo *Beyond Crysta C (Coordinate Measuring Machine)*. Foi realizada a medição dos 588 furos devidamente divididos em 03 CDPs, onde foram testados com os três ângulos de hélice 20°, 30° e 40° (Figura 21). A medição foi realizada em um ponto distinto do furo no centro da chapa, e em cada furo foram coletados 04 pontos de contato para uma melhor definição do  $\varnothing$  do furo. O furo a ser realizado possui o  $\varnothing$  nominal de 4,771 mm e sua tolerância é de -0,00 +0,018mm, ou seja, será

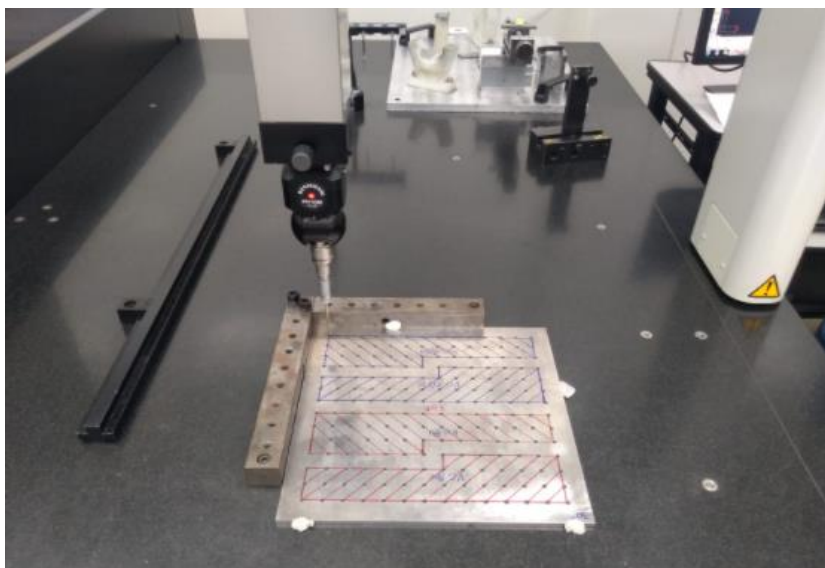
considerado aprovado em relação ao dimensional aqueles furos que apresentarem medida diametral entre 4,762 e 4,780 mm. Após a coleta dos dados referentes aos valores de diâmetro realizou-se uma análise de capacidade de processo para os dados obtidos.

Figura 20 - Máquina de Medição Tridimensional Referenciada.



Fonte: O Autor

Figura 21 - Posição em X, Y e Z do CDP para medição



Fonte: O Autor

#### 4.7 CONDIÇÕES OPERACIONAIS DOS EXPERIMENTOS

As furações foram realizadas em uma superfície usinada plana e paralela aos planos X e Y da máquina. O material furado não possui nenhum tipo de pré-furo, ou seja, todos os furos foram feitos em cheio. Os parâmetros de usinagem utilizados em todos os experimentos para a  $v_c = 80$  m/min foram:  $v_f = 428$  mm/min,  $f = 0,08$  mm/rot e rotação de 5351 RPM. Para a  $v_c$  de 80 m/min que foi feita uma réplica dos parâmetros utilizados, o que possibilitou obter melhor confiabilidade dos resultados obtidos para cada ângulo de hélice testado.

Já para a  $v_c = 100$  m/min os parâmetros foram:  $v_f = 533$  mm/min,  $f = 0,08$  mm/rot e rotação de 6668 RPM. Para esta  $v_c$  também foi feita uma réplica dos parâmetros utilizados, tanto da  $v_c$  quanto do  $f$ (mm/rot), seguindo a mesma estratégia do experimento anterior. Os parâmetros foram definidos conforme indicado no catálogo técnico da fabricante de ferramentas em Metal Duro OSG SULAMERICANA, e calculados conforme as equações da Tabela 3.

Tabela 3 – Equações dos parâmetros de corte

Parâmetro	Equação	
Velocidade de corte ( $v_c$ )	$\frac{\pi * \varnothing * \text{RPM}}{1000}$	<b>[m/min]</b>
Rotação (rpm)	$\frac{1000 * v_c}{\pi * \varnothing}$	<b>[min-1]</b>
Velocidade de avanço ( $v_f$ )	$f * \text{RPM}$	<b>[mm/min]</b>
Avanço ( $f$ )	$v_f / \text{RPM}$	<b>[mm/rot]</b>

Fonte: O Autor

A fixação das ferramentas no centro de usinagem foi realizada por pinça (Figura 22), e a fixação do material na máquina foi feita utilizando uma morsa.

Figura 22 - Fixação da ferramenta.

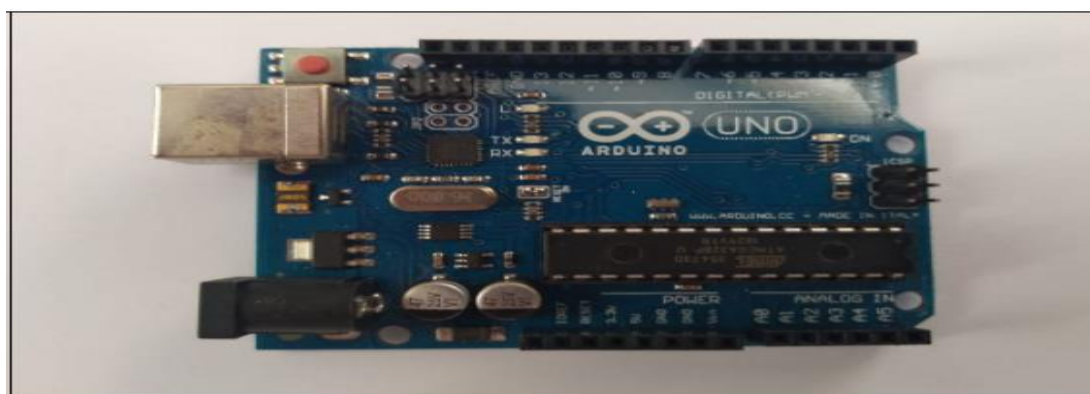


Fonte: O Autor

#### 4.8 CONDIÇÕES OPERACIONAIS DOS PERIFÉRICOS DE MEDIÇÃO

No processo de monitoramento dos experimentos foi verificado o nível de vibração que cada ferramenta ofereceu ao processo durante a furação. As verificações dos índices de vibração foram realizadas utilizando-se de um acelerômetro ADXL 335 em conjunto com uma Placa de Arduino UNO interligada com o Matlab®. A Placa Arduino é ligada diretamente ao PC por uma porta USB (Figura 23) com todo o conjunto ligado (Placa Arduino, peça usinada e computador com programa Matlab®) e assim é possível ter uma visão clara e objetiva de quanto cada ferramenta produz de vibração, frente às condições de processo impostas. Assim, foi possível identificar qual ângulo de hélice se comporta melhor na usinagem da liga AL7475.

Figura 23 - Placa Arduino.

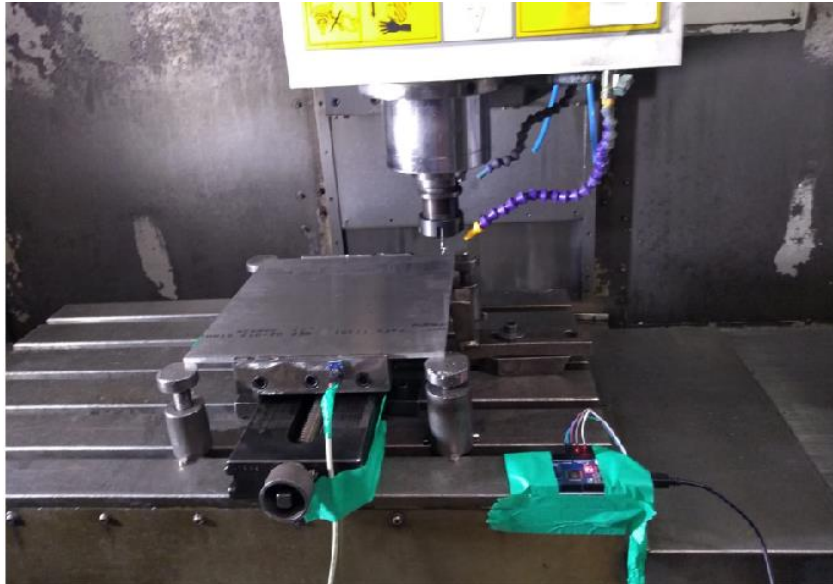


Fonte: O Autor

#### 4.9 ESTRUTURA PARA COLETA DE DADOS DO ARDUINO

Para a devida coleta de dados do conjunto placa Arduino, PC e máquina de usinagem foi utilizada uma sólida estrutura, sendo que isso proporcionou mais um resultado a ser coletado para a veracidade deste trabalho, que é a vibração gerada durante a usinagem de cada broca com seu ângulo de hélice distinto, sempre quando em contato com o CDP usinado. Esta montagem pode ser observada na Figura 24 e Figura 25.

Figura 24 - Placa Arduino fixada na base do CDP a ser usinado.



Fonte: O Autor



Figura 25 - Computador utilizado para coletar dados gráficos durante a usinagem.



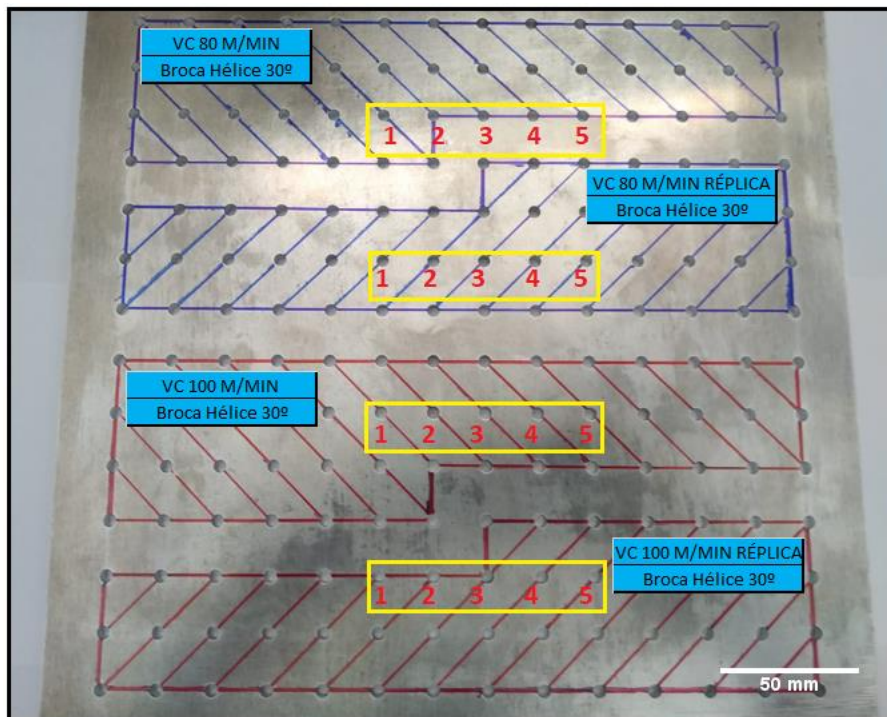
Fonte: O Autor

Ao avaliar os resultados devidamente gerados pelos dados coletados do Arduino pela Placa ADXL 335 e convertido em sinal pelo programa MATLAB, observamos que independentemente do ângulo de hélice testado ( $20^\circ$ ,  $30^\circ$  ou  $40^\circ$ ) não houve vibração no processo sensível o bastante para que pudesse ser capturada e convertida em sinal gráfico. Isso ocorreu possivelmente devido à um problema de comunicação dos dados coletados entre placa Arduino e o computador utilizado para a aquisição. Em vista desta inconsistência, os resultados do monitoramento de vibrações foram suprimidos neste estudo.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

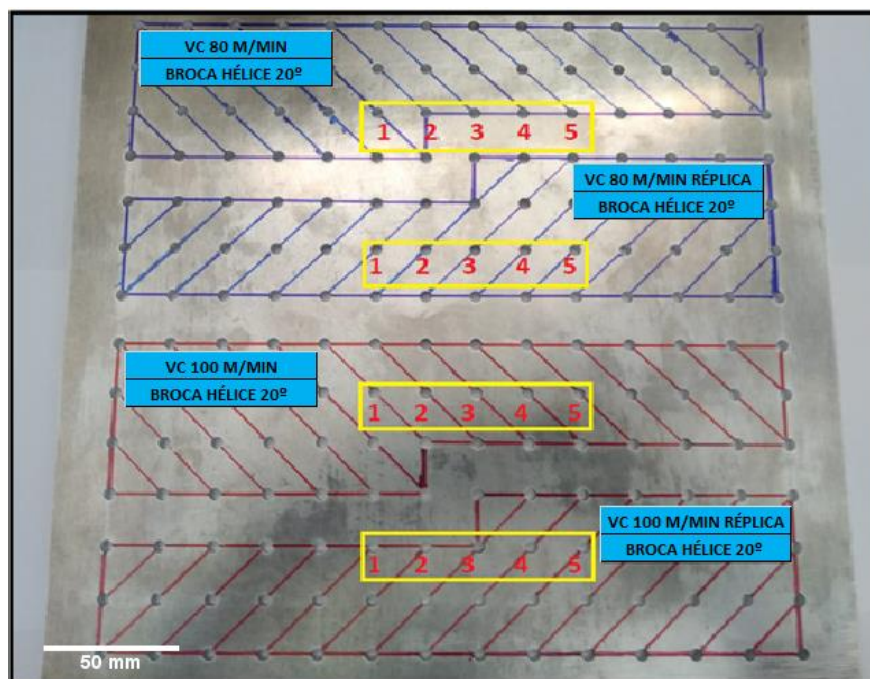
Após a realização dos ensaios verificou-se que houve uma grande variação entre os resultados, com relação ao acabamento dos furos e diâmetro deles. A ferramenta de ângulo de hélice de  $30^\circ$  apresentou um melhor resultado para as questões que envolvem desvio de furos, acabamento visual e principalmente rebarba criada na saída da furação, definida como “chapéu chinês”. Na Figura 26, Figura 27 e Figura 28 é possível visualizar o CDP já com todos os ensaios realizados com a broca com ângulos de hélice de  $30^\circ$ ,  $20^\circ$  e  $40^\circ$  com seus respectivos pontos de coleta circundados.

Figura 26 - Entrada do furo do CDP realizado com broca de ângulo de Hélice  $30^\circ$ .



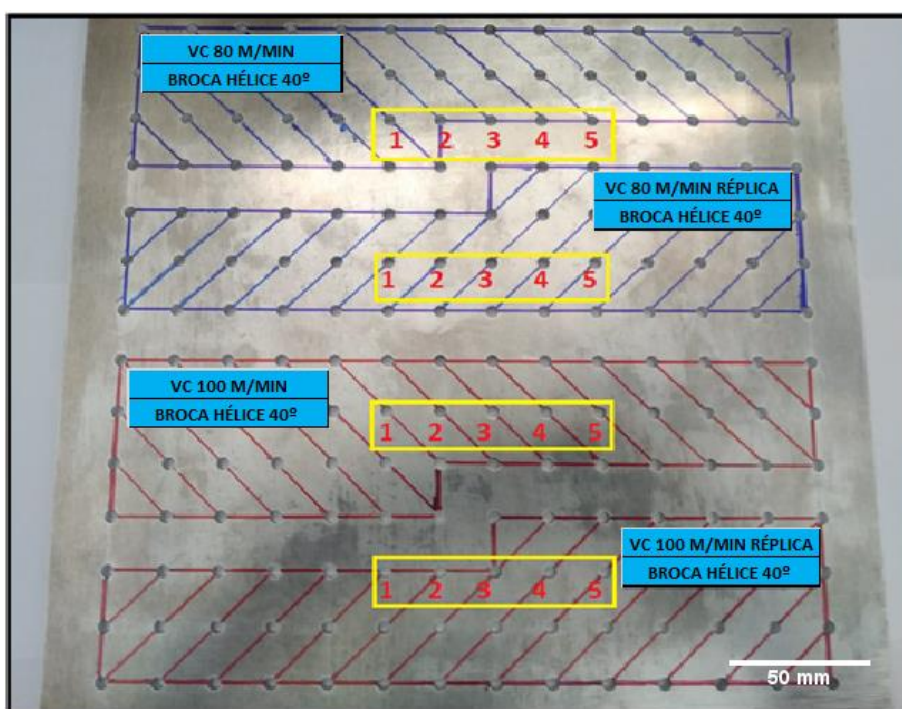
Fonte: O Autor

Figura 27 - Entrada do furo do CDP realizado com broca de ângulo de Hélice 20°.



Fonte: O Autor

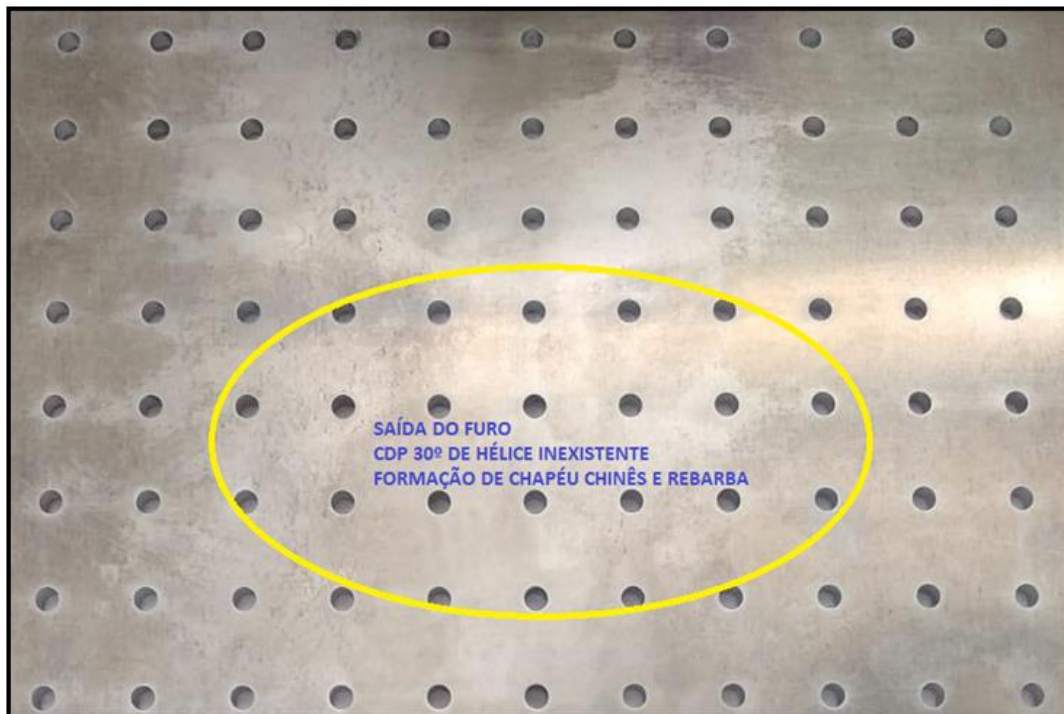
Figura 28 - Entrada do furo do CDP realizado com broca de ângulo de Hélice 40°.



Fonte: O Autor

Já na Figura 29 podemos observar a saída dos furos usinados com broca de 30° de hélice. Vê-se que neste caso a saída está livre de rebarba e de “chapéu chinês”, ou mesmo de qualquer marca ou desvio provocado durante a usinagem. A saída apresentou um aspecto visual limpo, o que elimina qualquer necessidade de qualquer retrabalho, economizando um tempo de processo o que é crucial para o setor aeroespacial.

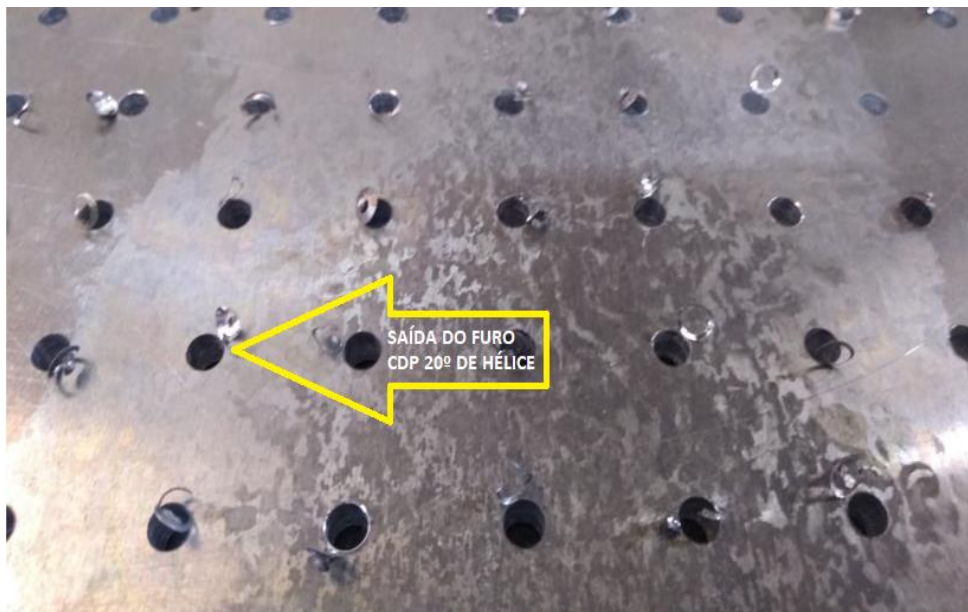
Figura 29 - Saída do furo do CDP realizado com broca de ângulo de Hélice 30°.



Fonte: O Autor

Observando a Figura 30, podemos observar que na saída dos furos usinados com broca de hélice de 20° houve muita formação de rebarba e “chapéu chinês”, o que elevaria significativamente o retrabalho desta peça manualmente em um painel de uma aeronave. Esse fato elevaria o tempo de ciclo de fabricação do produto, e conseqüentemente elevaria seu preço final.

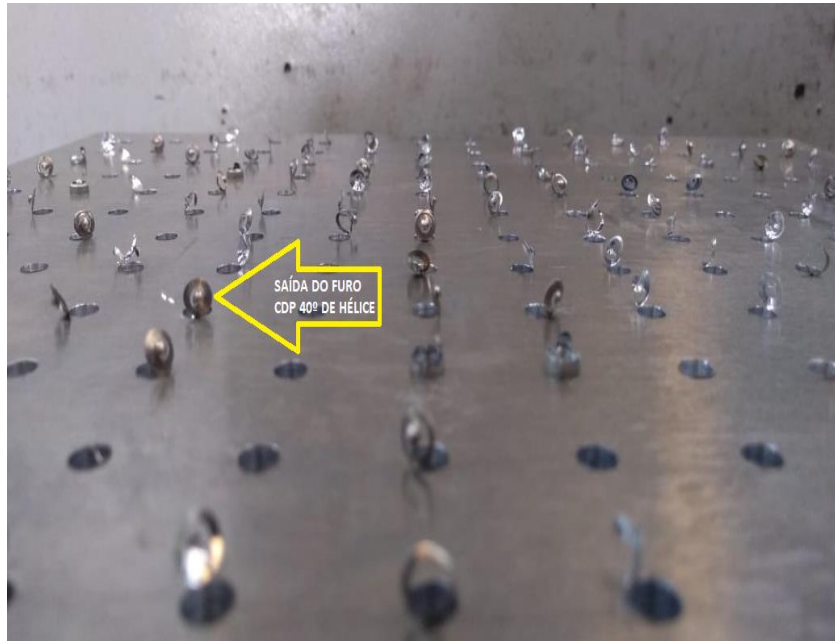
Figura 30 - Saída do furo do CDP realizado com broca de ângulo de Hélice 20°.



Fonte: O Autor

Na Figura 31 é mostrada a saída dos furos usinados com a broca de 40° de hélice, e constata-se que tanto a altura de rebarba quanto a formação de “chapéu chinês” elevam-se para um nível crítico, o que inviabilizaria o retrabalho desta peça e faria com que ela fosse reprovada pelo controle de qualidade do processo, tendo necessidade de substituição, o que elevaria ainda mais o custo do produto final.

Figura 31 - Saída do furo do CDP realizado com broca de ângulo de Hélice 40°.

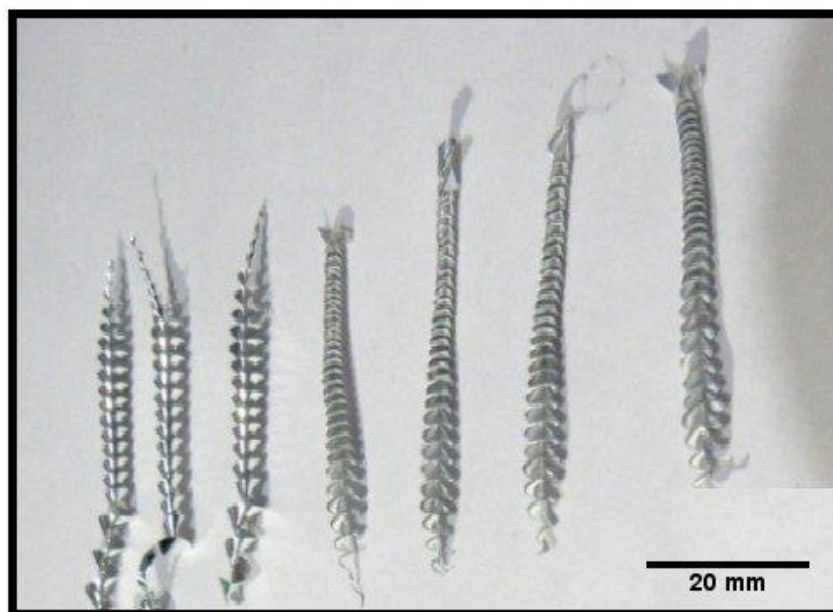


Fonte: O Autor

## 5.1 COMPORTAMENTO DOS CAVACOS

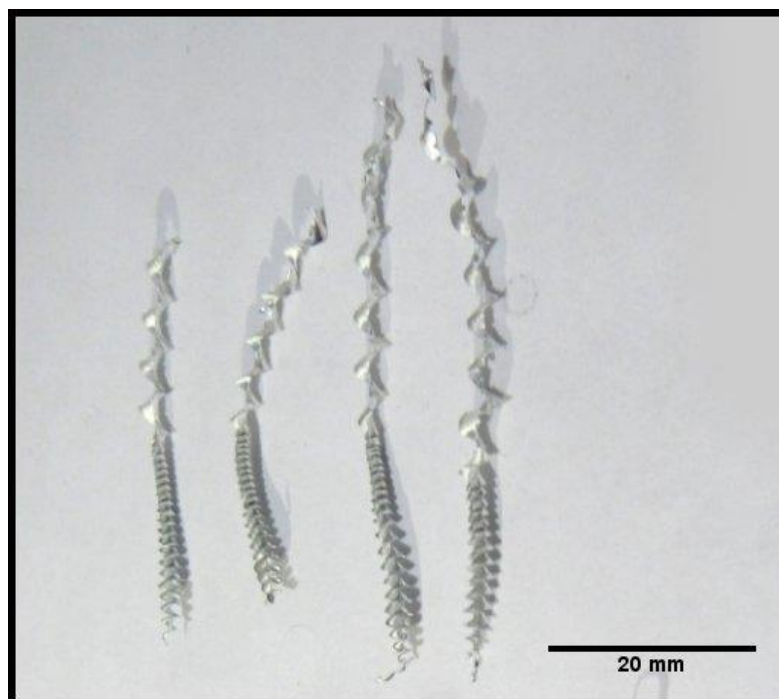
O bom escoamento de cavacos é alcançado quando a formação deles é adequada, sendo uma formação de cavacos considerada ruim quando esses são excessivamente longos. Isso pode causar o entupimento dos furos, resultando em acabamento superficial insatisfatório e quebra da ferramenta. Para a usinagem realizada com brocas de ângulo 20° e 40°, os cavacos obtidos tiveram seu formato alongado, como evidenciado na Figura 32, Figura 33, Figura 34 e Figura 35.

Figura 32 - Cavaco gerado com Broca com Ângulo de Hélice  $20^\circ$   $vc=80$  m/min.



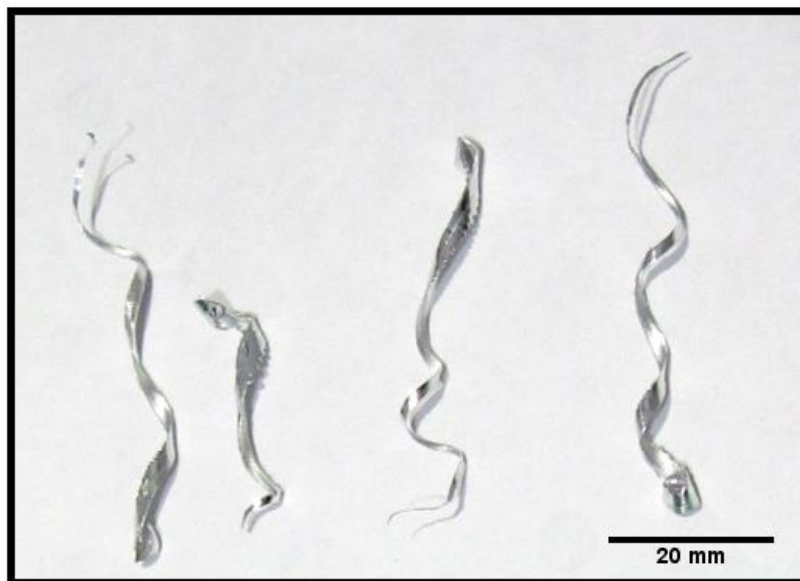
Fonte: O Autor

Figura 33 - Cavaco gerado com Broca com Ângulo de Hélice  $20^\circ$   $vc=100$  m/min.



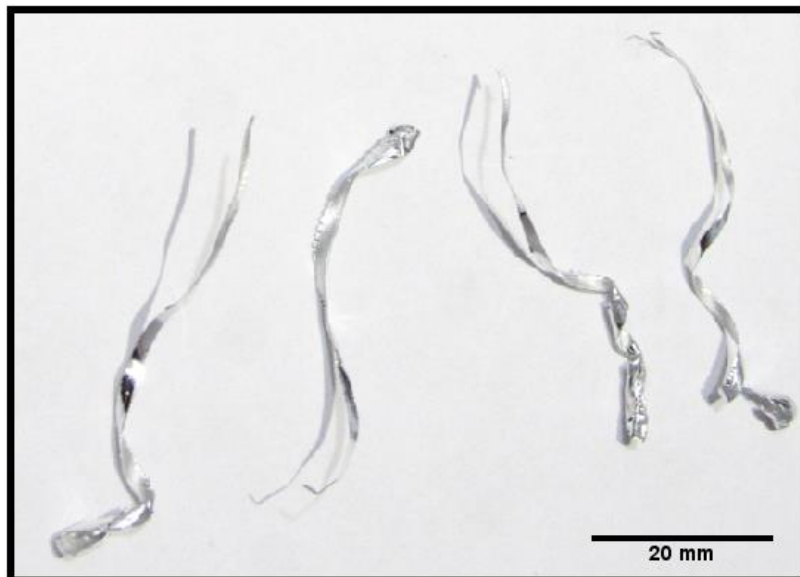
Fonte: O Autor

Figura 34 - Cavaco gerado com Broca com Ângulo de Hélice  $40^\circ$   $v_c=80$  m/min



Fonte: O Autor

Figura 35 - Cavaco gerado com Broca com Ângulo de Hélice  $40^\circ$   $v_c=100$  m/min.

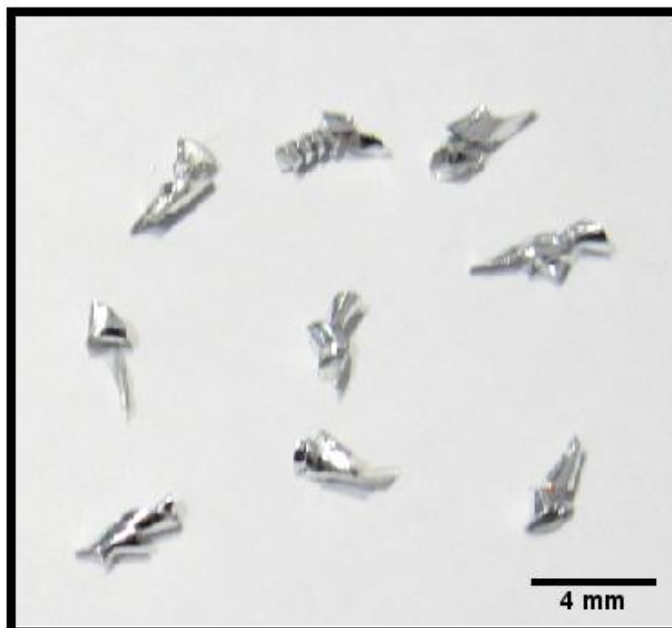


Fonte: O Autor

O cavaco obtido com ângulo de hélice de  $30^\circ$  foi gerado de maneira uniforme (Figura 36 e Figura 37), sendo pequeno e quebradiço, o que é ideal para qualquer tipo de usinagem, principalmente na furação pelo fato de que os cavacos precisam caminhar por dentro dos canais das brocas até a sua saída da peça.

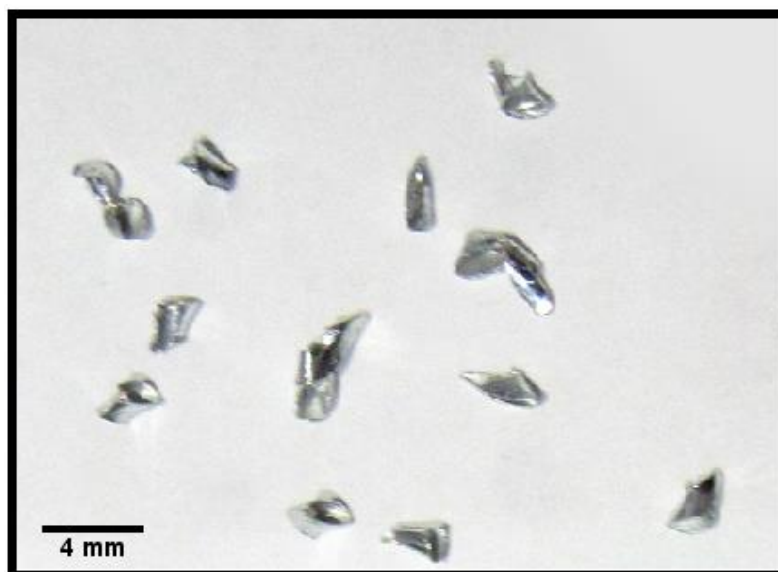


Figura 36 - Cavaco gerado com Broca com Ângulo de Hélice  $30^\circ$   $v_c=80$  m/min



Fonte: O Autor

Figura 37 - Cavaco gerado com Broca com Ângulo de Hélice  $30^\circ$   $v_c=100$  m/min



Fonte: O Autor

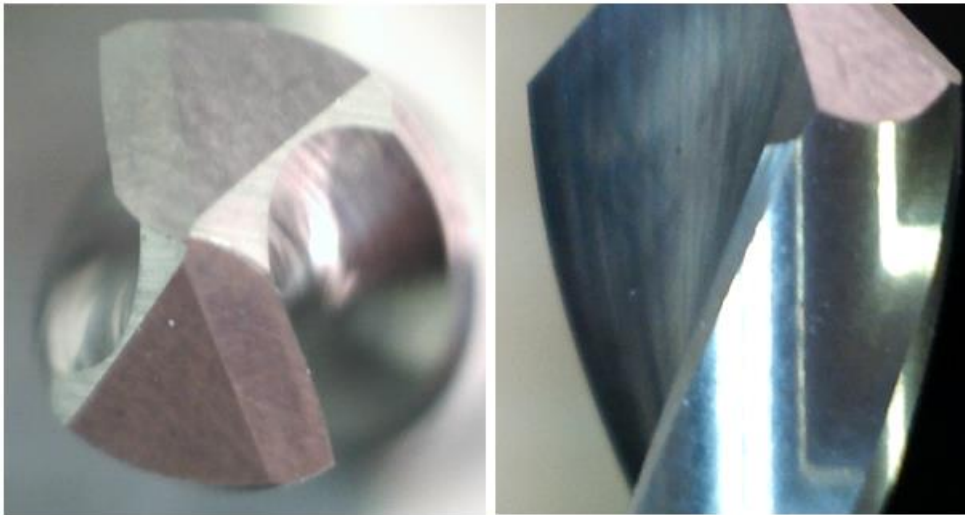
## 5.2 PRIMEIRO ENSAIO - ÂNGULO DE HÉLICE DE $30^\circ$

O primeiro ensaio foi realizado com a broca de ângulo de hélice de  $30^\circ$  e  $\varnothing$  de corte 4,762 mm (equivalente a 3/16 polegadas no setor Aeroespacial), furação está sendo configurada como furação primária feita em processo manual, semiautomático

58

e automático em mais de 70% da aeronave. Neste primeiro ensaio foram testadas duas velocidades de corte, sendo 80 e 100 m/min com suas devidas réplicas para comprovação e veracidade dos valores encontrados. As imagens da ferramenta nova são mostradas na Figura 38.

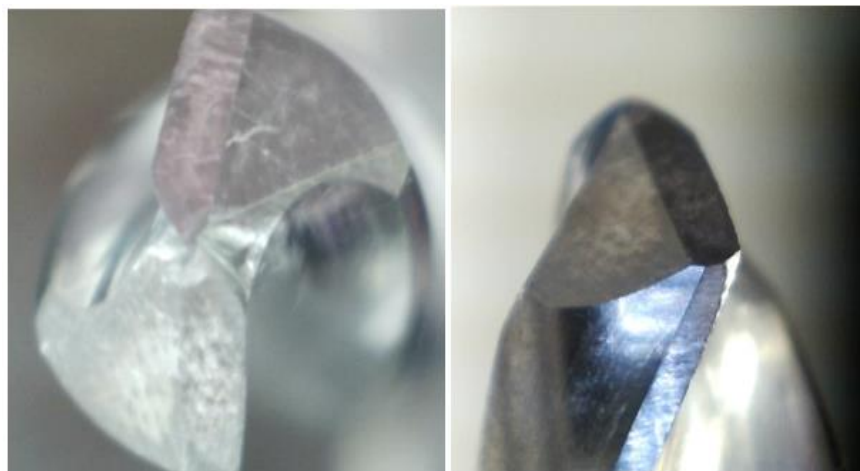
Figura 38 - Broca, com ângulo de hélice 30°, nova.



Fonte: O Autor

A ferramenta realizou os 196 furos propostos e não houve dificuldades por parte da máquina em realizar as furações. Também não foram detectados ruídos resultantes da vibração da ferramenta quando em contato com o CDP. Após o término das furações a ferramenta foi limpa e teve as suas arestas de corte visualizadas no microscópio óptico, conforme Figura 39. Nota-se a presença de alumínio junto à guia da broca, ou seja, formação de aresta postiza de corte (APC), sendo normal e aceitável na furação de alumínio.

Figura 39 - Broca, com ângulo de ponta 30°, após 196 furos com vc de 80 e 100 m/min



Fonte: O Autor

Com relação aos furos feitos, neste ensaio, percebe-se que não a formação de rebarbas na entrada e nem na saída do furo conforme Figura 29 e Figura 30. Os 196 furos atenderam ao exigido pela tolerância do diâmetro do furo, ou seja, suas dimensões permaneceram entre 4,762 e 4,780 mm. As medidas encontradas para cada furo são estão dispostas na Tabela 4, Tabela 5, Tabela 6 e Tabela 7, separadas por séries de 49 furos, juntamente com as respectivas velocidades de corte que foram utilizadas durante o processo de furação.

Tabela 4 - Diâmetro dos furos – Ângulo de Hélice 30° vc=80 m/min.

Furo	Ø (mm)	Furo	Ø (mm)	Furo	Ø (mm)	Furo	Ø (mm)
1	4,765	14	4,762	27	4,770	40	4,764
2	4,770	15	4,764	28	4,764	41	4,770
3	4,769	16	4,770	29	4,770	42	4,772
4	4,767	17	4,772	30	4,764	43	4,768
5	4,763	18	4,765	31	4,770	44	4,770
6	4,762	19	4,770	32	4,770	45	4,763
7	4,764	20	4,769	33	4,769	46	4,764
8	4,770	21	4,767	34	4,767	47	4,771
9	4,772	22	4,770	35	4,770	48	4,763
10	4,768	23	4,772	36	4,772	49	4,765
11	4,770	24	4,768	37	4,765		
12	4,763	25	4,770	38	4,768		
13	4,769	26	4,771	39	4,770		

Fonte: O Autor

Tabela 5 - Diâmetro dos furos – Ângulo de Hélice 30° (réplica) vc=80 m/min.

Furo	Ø (mm)	Furo	Ø (mm)	Furo	Ø (mm)	Furo	Ø (mm)
1	4,763	14	4,765	27	4,770	40	4,769
2	4,770	15	4,770	28	4,773	41	4,765
3	4,772	16	4,772	29	4,766	42	4,768
4	4,761	17	4,774	30	4,769	43	4,775
5	4,766	18	4,771	31	4,774	44	4,774
6	4,765	19	4,774	32	4,771	45	4,770
7	4,770	20	4,771	33	4,765	46	4,768
8	4,773	21	4,765	34	4,768	47	4,770
9	4,775	22	4,768	35	4,771	48	4,773
10	4,766	23	4,765	36	4,761	49	4,771
11	4,768	24	4,774	37	4,766		
12	4,770	25	4,774	38	4,765		
13	4,769	26	4,769	39	4,770		

Fonte: O Autor

Tabela 6 - Diâmetro dos furos – Ângulo de Hélice 30° vc=100 m/min.

Furo	Ø (mm)	Furo	Ø (mm)	Furo	Ø (mm)	Furo	Ø (mm)
1	4,768	14	4,766	27	4,771	40	4,766
2	4,770	15	4,771	28	4,773	41	4,770
3	4,767	16	4,769	29	4,770	42	4,768
4	4,766	17	4,770	30	4,775	43	4,769
5	4,771	18	4,773	31	4,768	44	4,774
6	4,773	19	4,770	32	4,771	45	4,771
7	4,770	20	4,775	33	4,768	46	4,773
8	4,775	21	4,773	34	4,766	47	4,768
9	4,768	22	4,770	35	4,765	48	4,774
10	4,765	23	4,767	36	4,770	49	4,770
11	4,766	24	4,766	37	4,774		
12	4,771	25	4,771	38	4,773		
13	4,768	26	4,773	39	4,770		

Fonte: O Autor

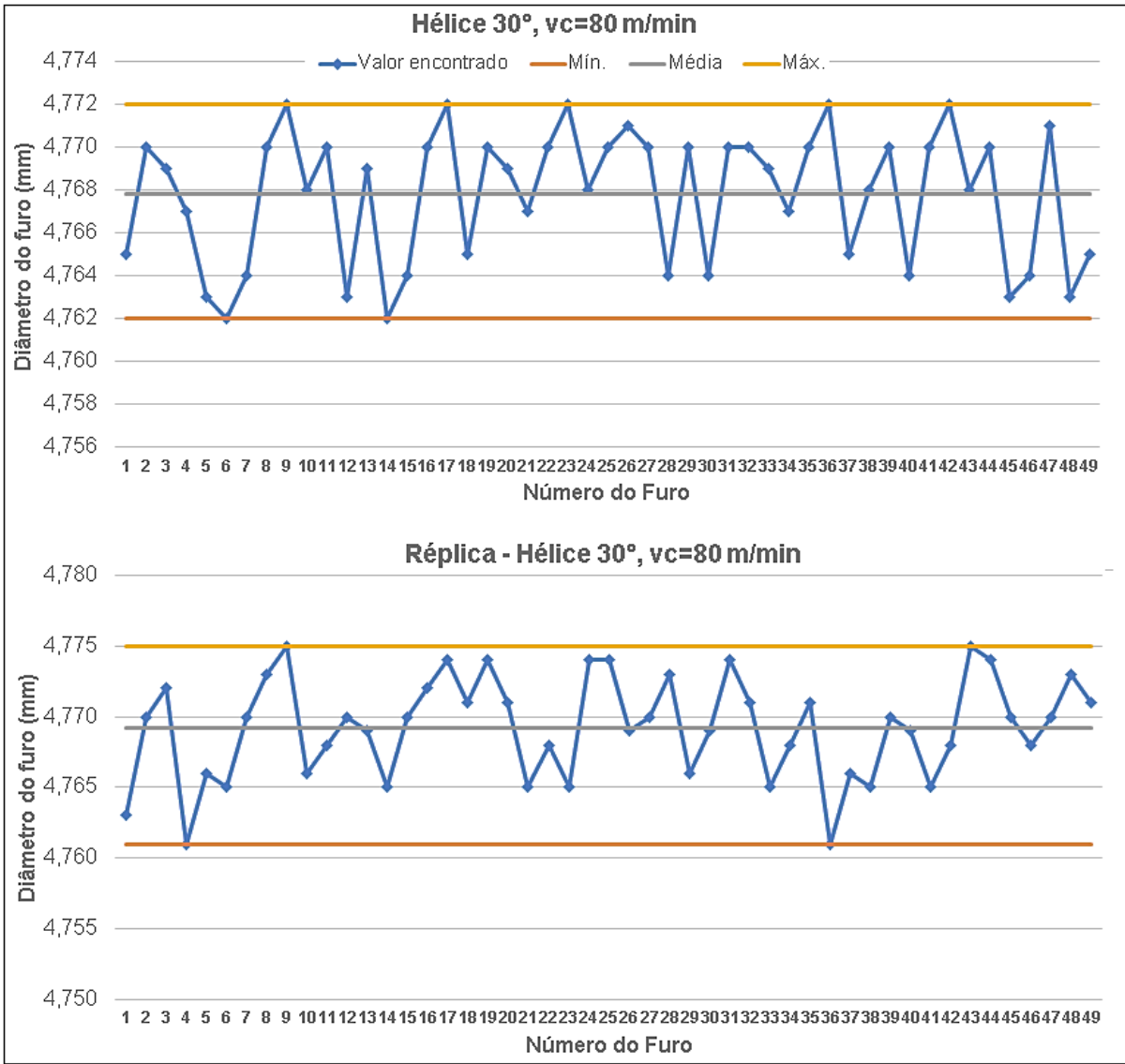
Tabela 7 - Diâmetro dos furos – Ângulo de Hélice 30° (réplica)  $v_c=100$  m/min.

Furo	Ø (mm)	Furo	Ø (mm)	Furo	Ø (mm)	Furo	Ø (mm)
1	4,765	14	4,770	27	4,769	40	4,770
2	4,770	15	4,767	28	4,770	41	4,771
3	4,771	16	4,768	29	4,773	42	4,773
4	4,769	17	4,766	30	4,766	43	4,766
5	4,773	18	4,770	31	4,772	44	4,774
6	4,769	19	4,771	32	4,765	45	4,775
7	4,766	20	4,769	33	4,770	46	4,770
8	4,772	21	4,773	34	4,772	47	4,768
9	4,774	22	4,769	35	4,766	48	4,768
10	4,765	23	4,766	36	4,770	49	4,769
11	4,770	24	4,766	37	4,766		
12	4,771	25	4,768	38	4,773		
13	4,772	26	4,769	39	4,768		

Fonte: O Autor

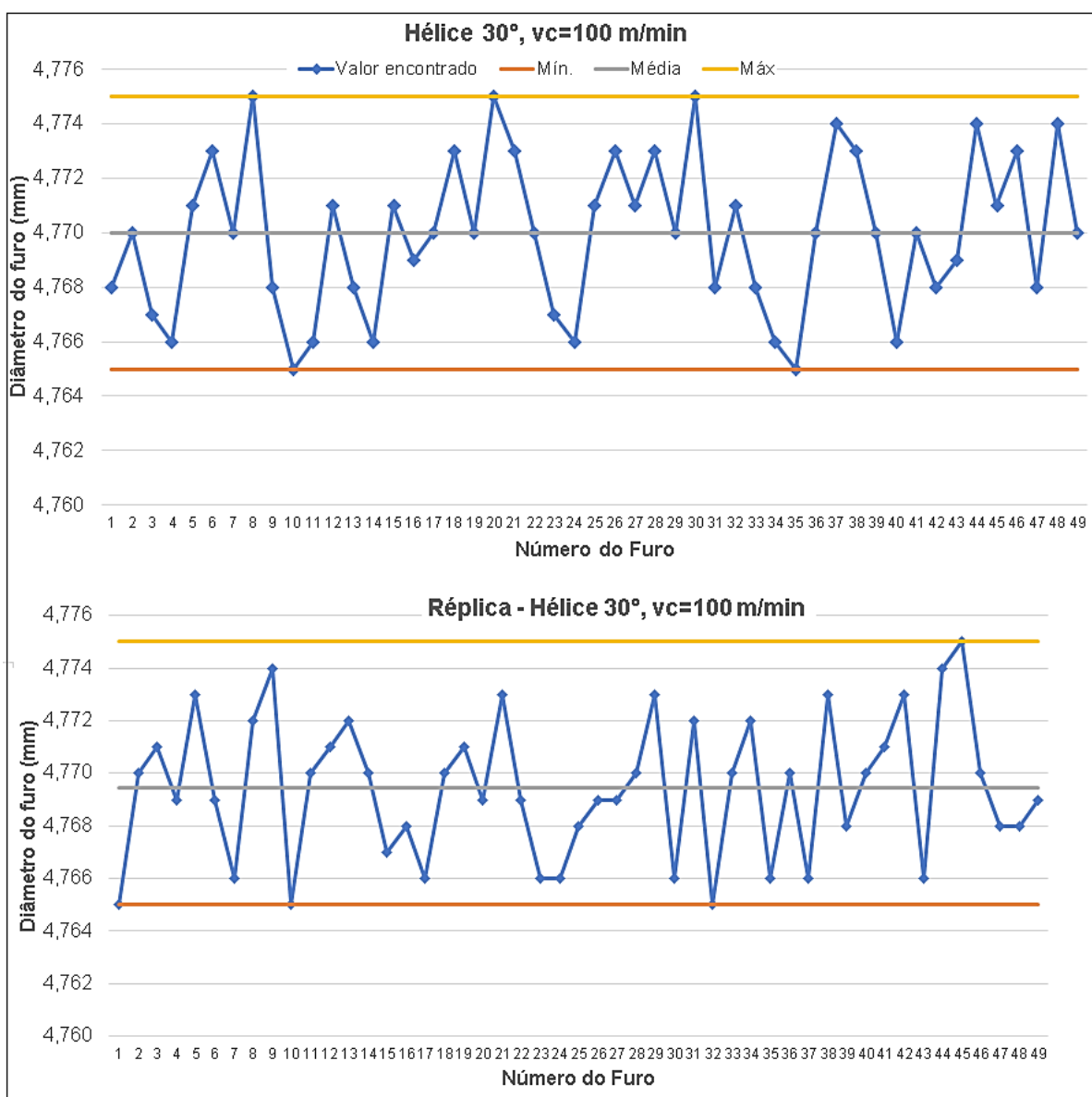
Em cada série de 49 furos testados verificou-se que eles não apresentaram uma grande variação de diâmetro (Figura 40), e os valores ficaram entre 4,762 e 4,772 mm e entre 4,765 e 4,775 mm (Figura 41).

Figura 40 - Características dimensionais dos furos – Hélice 30°, 80 m/min.



Fonte: O Autor

Figura 41 - Características dimensionais dos furos – Hélice 30°, 100 m/min.



Fonte: O Autor

### 5.3 SEGUNDO ENSAIO - ÂNGULO DE HÉLICE DE 40°

O segundo ensaio foi realizado com a broca de ângulo de hélice de 40° e Ø de corte igual a 4,762 mm, sendo que a ferramenta ainda nova é mostrada na Figura 42.

Figura 42 – Broca com ângulo de hélice 40°, nova.



Fonte: O Autor

A ferramenta realizou os 196 furos propostos. A máquina não apresentou nenhum tipo de dificuldade em realizar as furações, como vibração ou mesmo esforço de corte demarcado graficamente em seu display. Após o término das furações a ferramenta foi limpa e teve as suas arestas de corte visualizadas no microscópio, conforme Figura 43. Nota-se que a ferramenta apresenta um ótimo estado de conservação com relação ao desgaste das arestas de corte, ela não sofreu nenhum tipo de avaria e não apresentou formação de APC.

Figura 43 - Broca, com ângulo de hélice de 40°, após 196 furos.



Fonte: O Autor

Ao realizar as medições dos diâmetros dos furos obtidos na velocidade de corte de 80 m/min notou-se que 90% deles tiveram seus valores acima da média de 4,771 mm (destacados na Tabela 8 e Tabela 9). Esta variação sempre para o valor máximo



do furo não é adequada para o setor aeroespacial, porque furos com esse valor favorecem a propagação de trincas na fuselagem ou podem ocasionar a ruptura de uma seção da fuselagem da aeronave.

Tabela 8 - Diâmetro dos furos – Ângulo de Hélice 40° vc=80 m/min.

Furo	Ø (mm)	Furo	Ø (mm)	Furo	Ø (mm)	Furo	Ø (mm)
1	4,766	14	4,771	27	4,775	40	4,778
2	4,771	15	4,771	28	4,775	41	4,775
3	4,779	16	4,768	29	4,779	42	4,773
4	4,770	17	4,766	30	4,770	43	4,771
5	4,772	18	4,775	31	4,770	44	4,779
6	4,770	19	4,777	32	4,773	45	4,772
7	4,773	20	4,771	33	4,773	46	4,778

Tabela 9 - Diâmetro dos furos – Ângulo de Hélice 40° vc=80 m/min  
(continuação).

8	4,773	21	4,779	34	4,778	47	4,773
9	4,775	22	4,768	35	4,780	48	4,776
10	4,773	23	4,765	36	4,771	49	4,772
11	4,776	24	4,771	37	4,771		
12	4,778	25	4,778	38	4,775		
13	4,780	26	4,775	39	4,771		

Fonte: O Autor

Tabela 10 - Diâmetro dos furos – Ângulo de Hélice 40° (réplica) vc=80 m/min.

Furo	Ø (mm)	Furo	Ø (mm)	Furo	Ø (mm)	Furo	Ø (mm)
1	4,777	14	4,776	27	4,766	40	4,770
2	4,777	15	4,767	28	4,772	41	4,773
3	4,772	16	4,768	29	4,778	42	4,773
4	4,768	17	4,771	30	4,775	43	4,770
5	4,778	18	4,774	31	4,772	44	4,773
6	4,772	19	4,778	32	4,779	45	4,773
7	4,771	20	4,775	33	4,780	46	4,773
8	4,770	21	4,779	34	4,771	47	4,778
9	4,773	22	4,773	35	4,774	48	4,780
10	4,775	23	4,778	36	4,777	49	4,771
11	4,769	24	4,774	37	4,774		
12	4,778	25	4,772	38	4,775		
13	4,775	26	4,774	39	4,774		

Fonte: O Autor

Tabela 11 - Diâmetro dos furos – Ângulo de Hélice 40° vc=100 m/min.

Furo	Ø (mm)	Furo	Ø (mm)	Furo	Ø (mm)	Furo	Ø (mm)
1	4,777	14	4,779	27	4,773	40	4,777
2	4,779	15	4,770	28	4,778	41	4,771
3	4,770	16	4,771	29	4,772	42	4,773
4	4,771	17	4,775	30	4,778	43	4,775
5	4,773	18	4,773	31	4,779	44	4,778
6	4,775	19	4,773	32	4,773	45	4,779
7	4,771	20	4,775	33	4,775	46	4,773
8	4,771	21	4,778	34	4,778	47	4,778
9	4,771	22	4,777	35	4,777	48	4,771
10	4,778	23	4,774	36	4,771	49	4,774
11	4,774	24	4,772	37	4,775		
12	4,772	25	4,771	38	4,771		
13	4,773	26	4,770	39	4,774		

Fonte: O Autor

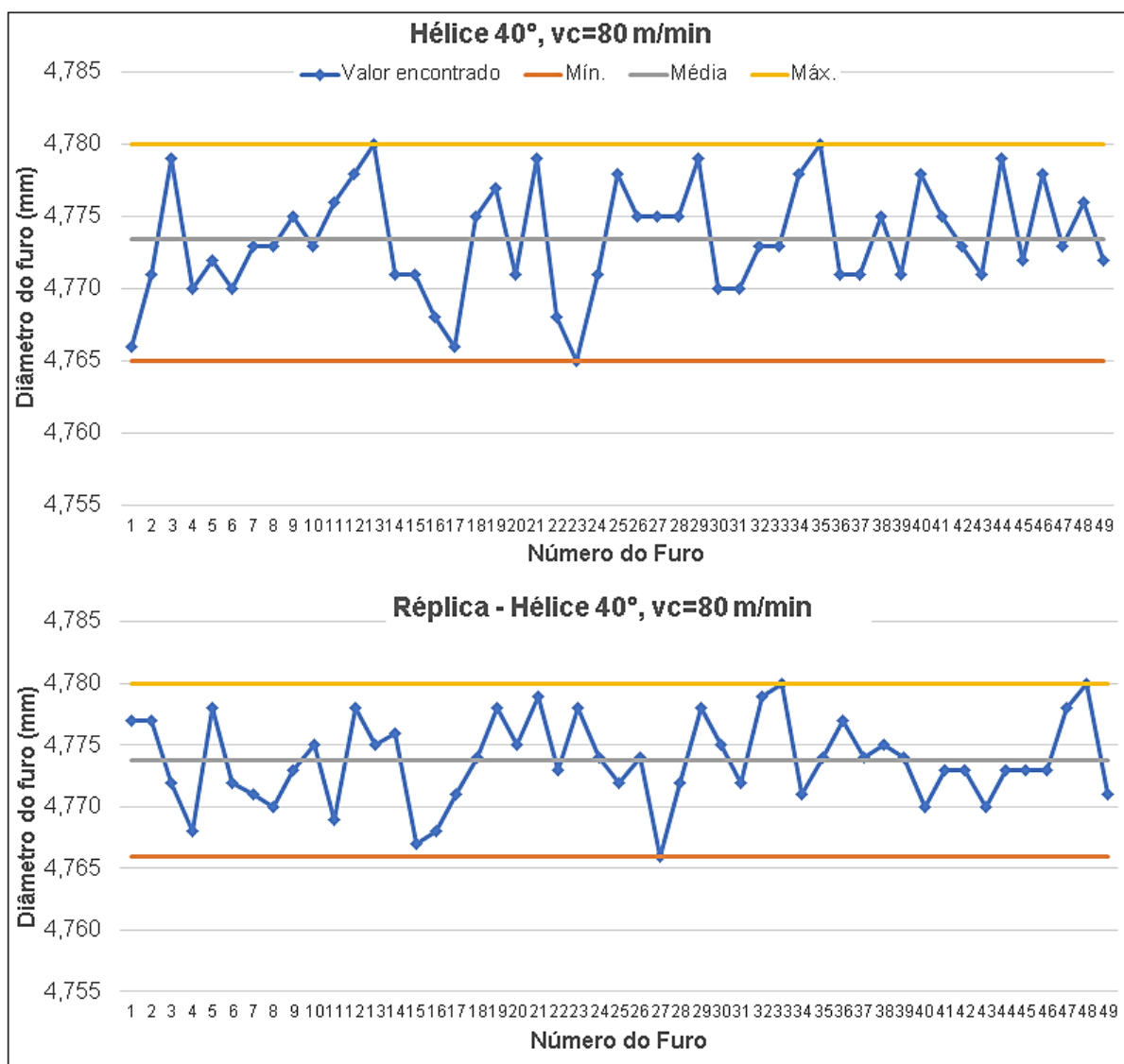
Tabela 12 - Diâmetro dos furos – Ângulo de Hélice 40° (réplica) vc=100 m/min.

Furo	Ø (mm)	Furo	Ø (mm)	Furo	Ø (mm)	Furo	Ø (mm)
1	4,772	14	4,773	27	4,780	40	4,778
2	4,778	15	4,775	28	4,778	41	4,771
3	4,774	16	4,779	29	4,774	42	4,771
4	4,773	17	4,771	30	4,779	43	4,778
5	4,773	18	4,774	31	4,771	44	4,775
6	4,771	19	4,771	32	4,775	45	4,774
7	4,778	20	4,779	33	4,771	46	4,773
8	4,774	21	4,772	34	4,780	47	4,771
9	4,775	22	4,776	35	4,776	48	4,775
10	4,776	23	4,778	36	4,773	49	4,778
11	4,779	24	4,771	37	4,774		
12	4,780	25	4,774	38	4,774		
13	4,771	26	4,771	39	4,771		

Fonte: O Autor

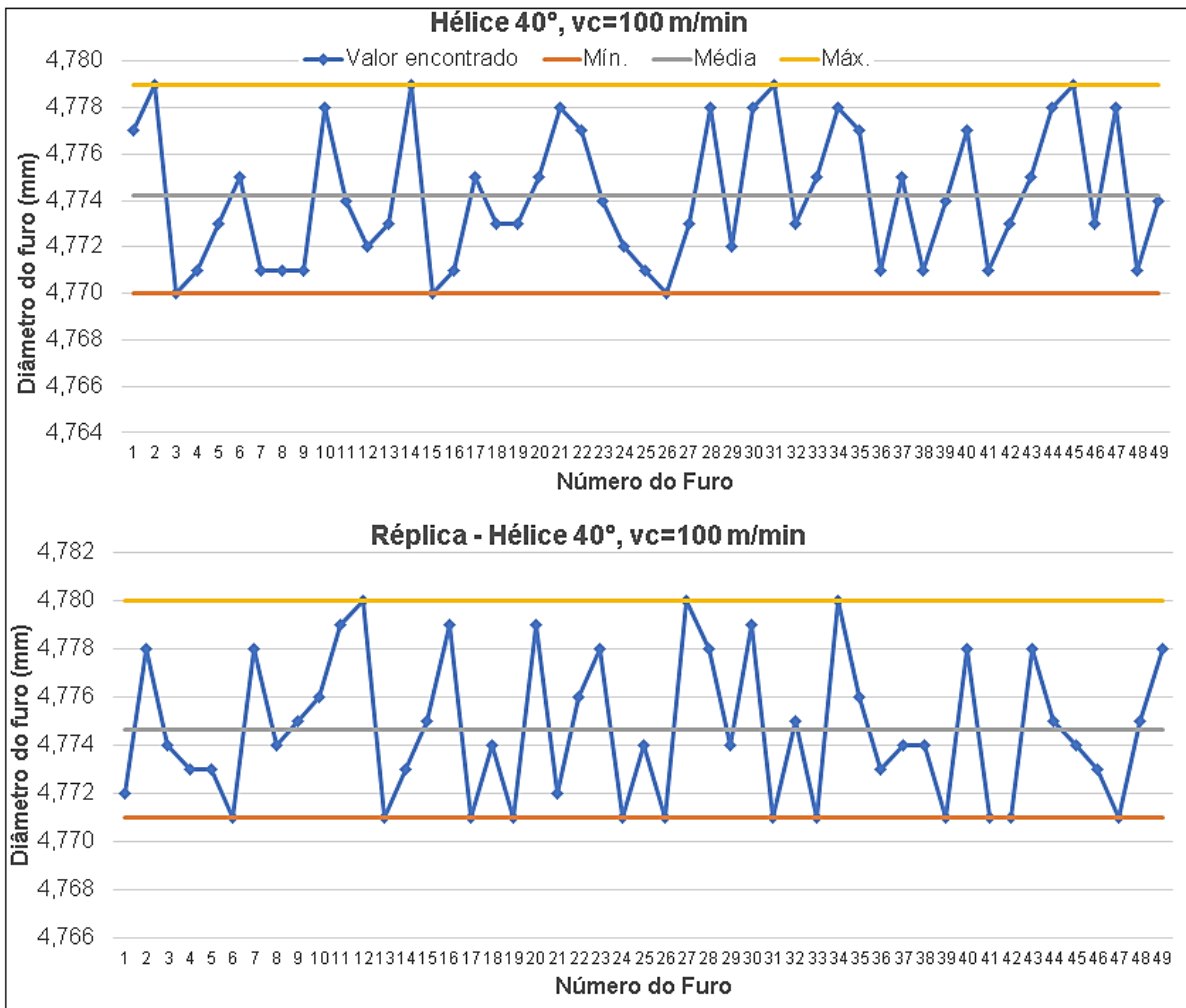
Na Figura 44 e Figura 45 é apresentada a variação dos valores dos diâmetros para 80 e 100 m/min.

Figura 44 - Características dimensionais dos furos – Hélice 40°, 80 m/min.



Fonte: O Autor

Figura 45 - Características dimensionais dos furos – Hélice 40°, 100 m/min.



Fonte: O Autor

#### 5.4 TERCEIRO ENSAIO - ÂNGULO DE HÉLICE 20 °

O terceiro ensaio foi realizado com a broca de ângulo de Hélice 20° e Ø de corte igual a 4,762 mm. A ferramenta nova é apresentada na Figura 46.

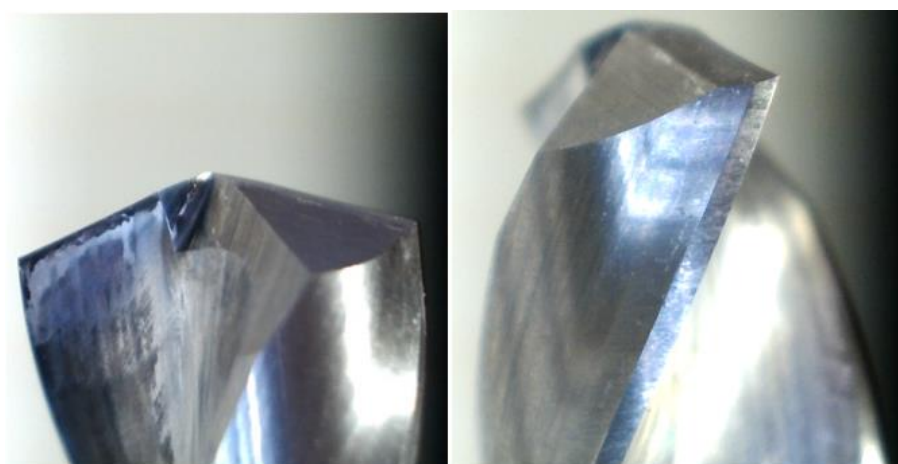
Figura 46 – Broca com ângulo de hélice 20°, nova.



Fonte: O Autor

Seguindo o mesmo procedimento anterior, após o término das furações a ferramenta foi limpa e teve as suas arestas de corte visualizadas no microscópio, conforme Figura 47. Nota-se que a ferramenta apresenta um ótimo estado de conservação com relação ao desgaste das arestas de corte, pois ela não sofreu nenhum tipo de avaria e não apresentou formação de APC. Em relação ao acabamento e rebarbas na entrada e saída do furo este ponto já foi mencionado neste trabalho anteriormente.

Figura 47 – Broca com ângulo de ponta 20°, após 196 furos.



Fonte: O Autor

Ao realizar as medições dos diâmetros dos furos notou-se que os diâmetros de 100% dos furos usinados com este ângulo de hélice ficaram com extrema variação do mínimo ao máximo estabelecido pela tolerância H8, ou seja, os valores variaram

de 4,762 à 4,780 mm, o que não gera confiabilidade para um processo de furação do setor aeroespacial. As medidas encontradas em cada furo são apresentadas na Tabela 12, Tabela 13, Tabela 14 e Tabela 15.

Tabela 13 - Diâmetro dos furos – Ângulo de Hélice 20° vc=80 m/min.

Furo	Ø (mm)	Furo	Ø (mm)	Furo	Ø (mm)	Furo	Ø (mm)
1	4,765	14	4,762	27	4,780	40	4,770
2	4,768	15	4,766	28	4,762	41	4,775
3	4,780	16	4,778	29	4,767	42	4,764
4	4,776	17	4,763	30	4,770	43	4,763
5	4,771	18	4,765	31	4,774	44	4,766
6	4,764	19	4,778	32	4,770	45	4,768
7	4,770	20	4,763	33	4,773	46	4,780
8	4,775	21	4,777	34	4,763	47	4,778
9	4,771	22	4,772	35	4,780	48	4,763
10	4,766	23	4,770	36	4,765	49	4,767
11	4,762	24	4,769	37	4,775		
12	4,778	25	4,762	38	4,776		
13	4,780	26	4,764	39	4,779		

Fonte: O Autor

Tabela 14 - Diâmetro dos furos – Ângulo de Hélice 20° (réplica) vc=80 m/min

Furo	Ø (mm)	Furo	Ø (mm)	Furo	Ø (mm)	Furo	Ø (mm)
1	4,766	14	4,766	27	4,766	40	4,768
2	4,761	15	4,778	28	4,764	41	4,755
3	4,778	16	4,763	29	4,778	42	4,770
4	4,763	17	4,780	30	4,763	43	4,763
5	4,774	18	4,774	31	4,761	44	4,770
6	4,770	19	4,780	32	4,775	45	4,761
7	4,773	20	4,776	33	4,771	46	4,765
8	4,762	21	4,773	34	4,766	47	4,767
9	4,765	22	4,779	35	4,771	48	4,777
10	4,768	23	4,762	36	4,774	49	4,780
11	4,770	24	4,765	37	4,776		
12	4,775	25	4,780	38	4,765		
13	4,761	26	4,767	39	4,763		

Fonte: O Autor

Tabela 15 - Diâmetro dos furos – Ângulo de Hélice 20° vc=100 m/min.

Furo	Ø (mm)	Furo	Ø (mm)	Furo	Ø (mm)	Furo	Ø (mm)
1	4,778	14	4,780	27	4,773	40	4,774
2	4,763	15	4,774	28	4,763	41	4,778
3	4,761	16	4,765	29	4,776	42	4,761
4	4,763	17	4,765	30	4,762	43	4,765
5	4,777	18	4,778	31	4,767	44	4,779
6	4,780	19	4,763	32	4,777	45	4,761
7	4,761	20	4,773	33	4,762	46	4,768
8	4,775	21	4,770	34	4,765	47	4780
9	4,771	22	4,761	35	4,765	48	4,761
10	4,761	23	4,770	36	4,763	49	4,772
11	4,777	24	4,771	37	4,777		
12	4,779	25	4,762	38	4,767		
13	4,763	26	4,764	39	4,775		

Fonte: O Autor

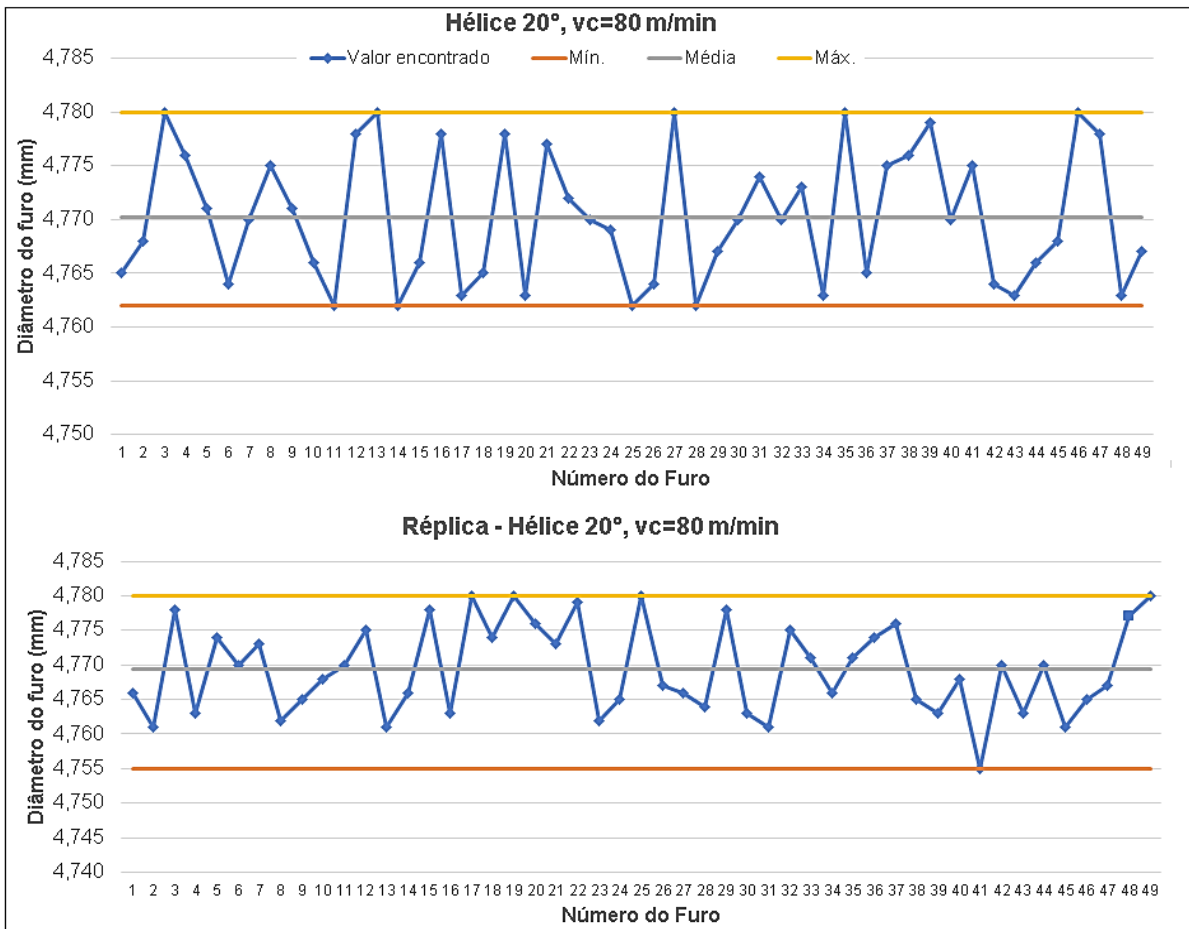
Tabela 16 - Diâmetro dos furos – Ângulo de Hélice 20° (réplica) vc=100 m/min

Furo	Ø (mm)	Furo	Ø (mm)	Furo	Ø (mm)	Furo	Ø (mm)
1	4,769	14	4,761	27	4,771	40	4,772
2	4,775	15	4,774	28	4778	41	4,773
3	4,762	16	4,770	29	4,778	42	4,762
4	4,763	17	4,775	30	4,761	43	4,776
5	4,770	18	4,766	31	4,771	44	4,767
6	4,774	19	4,769	32	4,766	45	4,779
7	4,768	20	4,771	33	4,774	46	4,776
8	4,773	21	4,761	34	4,779	47	4,763
9	4,780	22	4,761	35	4,777	48	4,773
10	4,765	23	4,780	36	4,774	49	4,765
11	4,764	24	4,773	37	4,768		
12	4,775	25	4,775	38	4,772		
13	4,775	26	4,764	39	4,776		

Fonte: O Autor

A variação nos valores dos diâmetros para pode ser vista na Figura 48 e Figura 49.

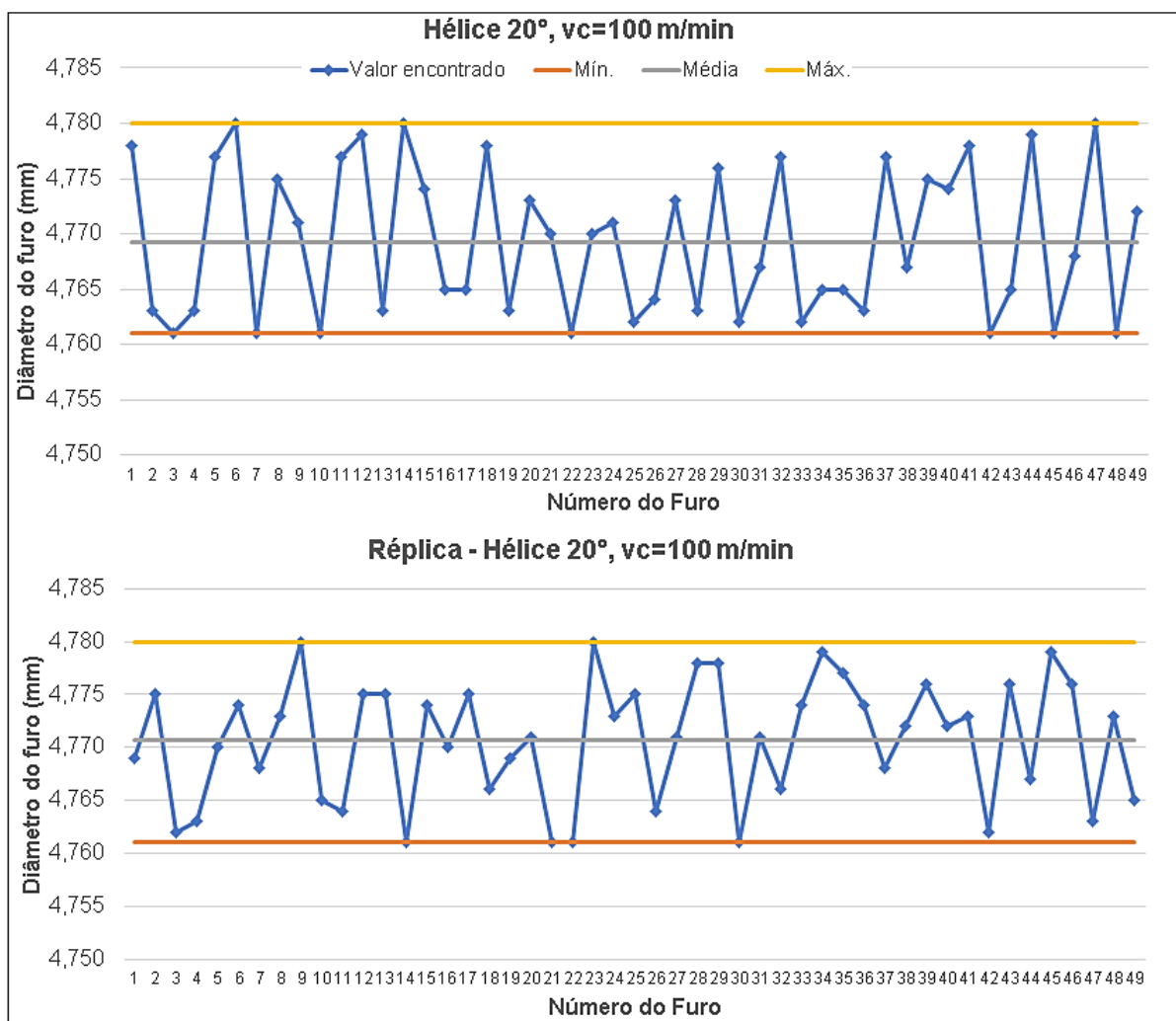
Figura 48 - Características dimensionais dos furos – Hélice 20°, 80 m/min.



Fonte: O Autor



Figura 49 - Características dimensionais dos furos – Hélice 20°, 100 m/min.



Fonte: O Autor

## 5. CONCLUSÕES

O desempenho das brocas utilizadas nos ensaios, em relação ao acabamento visual dos furos, seus valores dos diâmetros bem como a formação de rebarba na saída deles foi bruscamente afetado pelo ângulo de hélice utilizado nas ferramentas, visto que os ensaios foram absolutamente coincidentes em condições de corte adotadas. Constatou-se então, através dos resultados encontrados, que o ângulo de hélice de 30° é o mais indicado para a furação de Alumínio 7475. Ele apresentou durante a realização dos testes uma coerência bem mais eficaz no controle dos diâmetros usinados, sendo que os furos ficaram 100% na média (4,771 mm) estabelecida, que é um dos objetivos do setor aeroespacial. A saída do furo também não apresentou formação de rebarba e nem de chapéu chinês, quem representa um grande problema para o setor aeroespacial. A formação de cavaco gerada com este ângulo é ideal para o processo de furação, pois eles foram gerados com formato pequenos e quebradiços, sem grandes impactos no acabamento superficial pois não foram encontrados riscos nas paredes internas no furo.

O ângulo de hélice de 40° também se comportou de forma estável mantendo a questão diametral dos furos, mas 100% dos furos ficaram da média para máxima (4,771 à 4,780 mm) o que não é bem querido para o setor aeroespacial podendo causar futuras trincas nestes furos. A saída do furo também apresentou formação de rebarba e chapéu, o que é prejudicial para o processo pois gera a necessidade de retrabalhos. Os cavacos gerados durante a usinagem foram longos, com potencial para geração de riscos dentro dos furos, prejudicando assim o seu acabamento interno.

Já os furos realizados com ângulo de hélice de 20° apresentaram uma questão totalmente fora dos padrões de estabilidade, com variação da mínima à máxima de 4,762 a 4,780 mm, demonstrando uma total instabilidade para o processo de furação que não é permitida no setor aeroespacial. A saída do furo também apresentou alta formação de chapéu chinês, o que causaria retrabalho para o processo. Quanto à questão comportamental dos cavacos gerados, este foi o pior caso dos três ângulos testados, pois além de serem longos eles apresentaram formato fino totalmente inaceitável para o setor aeroespacial porque, além de levar a um mal acabamento interno dos furos através de riscos ou marcas, o cavaco poderia causar na broca a formação do famoso “ninho de passarinho”, que é o acúmulo cavacos em forma de

bolo na ferramenta e na fixação.

Em relação aos experimentos de monitoramento de vibração durante a furação, uma falha de aquisição dos dados prejudicou a análise destes sinais. Para trabalhos futuros recomenda-se a utilização de cabeamento e conexões elétricas mais robustas. Acredita-se que o problema encontrado foi motivado por um destes fatores o que implicou no resultado final.

Com todas as informações devidamente expostas anteriormente neste trabalho podemos concluir que o melhor ângulo de hélice para se usinar a liga aeronáutica AL7475 é o ângulo de hélice de 30°.

## REFERÊNCIAS

- AAMIR, M. *et al.* A review: drilling performance and hole quality of aluminium alloys for aerospace applications. **Journal Of Materials Research And Technology**. [S. L.], p. 12484-12500. dez. 2020a.
- AAMIR, M. *et al.* Multi-hole simultaneous drilling of aluminium. **Journal of Materials Research and Technology**. [S. L.], p. 3994-4006, jun. 2020b.
- AAMIR, M. *et al.* Performance Analysis of Multi-Spindle Drilling of Al2024 with TiN and TiCN Coated Drills Using Experimental and Artificial Neural Networks Technique. **Applied Science**. [S. L.], p. 8633, dez. 2020c.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 3002-1: 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**. [S. L.]: Abnt, 2013.
- AMORIM, H. J. de. **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro**. 2002. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.
- BARBOSA, G. F. **Desenvolvimento de um modelo de análise para implantação de automação na manufatura aeronáutica**. 2012. 332 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2012.
- BASTOS, C. E. **Atributos de Parceiras de Sucesso em Cadeias de Suprimentos: Um Estudo de Caso na Relação Fabricante-Fornecedor na Indústria Aeronáutica**. 2006. 182 f. Tese (Doutorado) - Curso de Administração, Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2006.
- BELAADI, A. *et al.* Mechanical characterization and optimization of delamination factor in drilling bidirectional jute fibre-reinforced polymer biocomposites. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. [S. L.], p. 2073-2094, out. 2020.
- BOEIRA, A. M. G. **Modelagem e simulação das forças na furação com brocas helicoidais a partir de dados obtidos no torneamento de segmentos cilíndricos**. 2010. 192 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.
- BOEIRA, A. M. G *et al.* Descrição da geometria de brocas helicoidais a partir de modelos matemáticos combinados a métodos de medição tridimensional. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 5., 2009, Belo Horizonte. **Anais [...]** . [S. L.]: Abcm, 2009. p. 1-10.
- BORRILE; FARIA. **Fabricação de Componentes Aeronáuticos**. São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2010. Color.

CAMPBELL JR, F. **Manufacturing Technology for Aerospace Structural Materials**. [S. L.]: Elsevier, 2011. 600 p.

CAMPBELL, F. C. **Aluminum, elements of metallurgy and engineering alloys**. [S.I.]: ASM International, p. 487–508, 2008.

CAMPOS, L. A. **Otimização do processo de torneamento de peças endurecidas por meio da definição do intervalo de máxima eficiência de corte**. 2004. 140 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

CASTILLO, W. J. G. **Furação Profunda de Ferro Fundido Cinzento GG25 com Brocas de Metal-Duro com Canais**. 2005. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

COMPOSITE WORLD. **Boeing sets pace for composite usage in large civil aircraft**. 2005. Disponível em: <https://www.compositesworld.com/articles/boeing-sets-pace-for-composite-usage-in-large-civil-aircraft>. Acesso em: 19 mar. 2022.

CONTRUCCI, J. G. **Aplicação de Redes Neurais Artificiais na predição de diâmetros e rugosidade durante o processo de furação**. 2012. 180 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista (Unesp), Bauru, 2012.

CUNHA, M. C.; LIMA, M. S. F. D. The influence of laser surface treatment on the fatigue crack growth of AA 2024-T3 aluminum alloy alclad sheet. **Surface & Coatings Technology**. [S. L.], p. 244-249, ago. 2017.

DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN8589-2: Fertigungsverfahren SpanenTeil 2: Bohren - Einordnung, Unterteilung, Begriffe**. Berlim: DIN, 2003.

DU, J.; CHEN, Z. Applying Organizational Ambidexterity in strategic management under a “VUCA” environment: Evidence from high tech companies in China. *International Journal of Innovation Studies*. [S. L.], p. 42-52, mar. 2018.

DURSun, T.; SOUTIS, C. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys. **Materials & Design**. [S. L.], p. 862-871, abr. 2014.

ELAJRAMI, M.; BERENGUEDIAB, M.; RONALD, G. Effect of various drilling procedures on the fatigue life of rivet holes. **Revue Synthèse**. [S. L.], p. 67-75, jun. 2009.

GIASIN, K.; AYWAR-SOBERANIS, S. An investigation of burrs, chip formation, hole size, circularity and delamination during drilling operation of GLARE using ANOVA. **Compos Struct**. [S. L.], p. 745-760, jan. 2017.

GIONES, F.; BREM, A.; BERGER, A. Strategic decisions in turbulent times: Lessons from the energy industry. **Business Horizons**. [S. L.], p. 215-225, abr. 2019.

GONÇALVES, M. R. **Estudo do Aumento no Diâmetro do Corpo de um Rebite a ser Cravado em Furos**. 2015. 70 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia

Mecânica, Universidade Estadual Paulista (Unesp), Guaratinguetá, 2015.

GU, W. *et al.* Effect of drilling process on fatigue life of open holes. **Tsinghua Science and Technology**. [S. L.], p. 54-57, dez. 2009.

HU, J. *et al.* Development of flexible drilling jig for wing-fuselage connection. **The Open Mechanical Engineering Journal**. S. L.], p. 460-466, jul. 2015.

KENNEDY, B. Survival of the fastest. **Cutting Tool Engineering**. [S. L.], p. 42-43, dez. 2009.

KÖNIG, W. **Tornear, Fresar e Furar**. (Tradução: Prof. Dr.-Ing. WALTER L. WEINGAERTNER. Aachen. 1981. 409 p.

LI, H. *et al.* Tool wear and hole quality investigation in dry helical milling of Ti-6Al-4V alloy. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. [S. L.], p. 1511-1523, mar. 2017.

LIU, J. *et al.* Effect of detail design on fatigue performance of fastener hole. **Materials & Design**. [S. L.], p. 976-980, 2010.

MACHADO, C. A. M. Estudo comparativo de diferentes geometrias de corte em broca de metal duro com canal reto em ferro fundido cinzento. 2011. 128 p. Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP, 2011.

MARTINS, R. A.; NETO, P. L. O. C. Indicadores de desempenho para a gestão pela qualidade total: uma proposta de sistematização. **Gestão & Produção**. [S. L.], p. 298-311, dez. 1998.

MOURITZ, A. P. **Introduction to Aerospace Materials**. Cambridge: Sawston, 2012. 621 p.

NASA, N. A. A. **The effect of hole quality on the fatigue life of 2024-T3 aluminum alloy sheet**. [S.I.]: On Demand Publishing, LLC-Create Space, 2004.

AVIATION NEWS. **Aircraft Facts**. Disponível em: <http://aviationnews.eu/>. Acesso em: 19 mar. 2022.

NIKNAM, S. A.; B. DAVOODI, J. P. D.; SONGMENE, V. Mechanical deburring and edge-finishing processes for aluminum parts - a review. **Int J Adv Manuf Technol**. [S.L.], p. 1101-1125, mar. 2018.

NOUARI, M. *et al.* Experimental analysis and optimisation of tool wear in dry machining of aluminium alloys. **Wear**. [S.L.], p. 1359-1368, set. 2003.

NOVASKI, O. **Custos da usinagem**. Campinas: Editora UNICAMP, 1991, 149 p.

OHNO, T. **Gestão dos postos de trabalho**. Porto Alegre: Bookman, 2015, 168 p.

PARENTI, P.; PAGANI, L.; ANNONI, M. Automatic identification of edge chipping defects in high precision drilling of cemented carbide. **Precision Engineering**. [S. L.], p. 383-393, set. 2019.

PINTO, G. T. D. B. **Análise da influência da geometria de brocas especiais na furação de chapas finas aeronáuticas**. 2010. 164 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

RICO-GARCIA, H.; SANCHEZ-ROMERO, J.; GOMIS, H. M. Parallel implementation of metaheuristics for optimizing tool path computation on CNC machining. **Computers in Industry**. [S. L.], dez. 2020.

RODRÍGUEZ-MONROY, C.; ARTO, J. R. V. Analysis of global manufacturing virtual networks in the aeronautical. **International Journal of Production Economics**. [S. L.], p. 314-323, ago. 2010.

ROZENFELD, H. *et al.* **Gestão de Desenvolvimento de Produtos: Uma referência para melhoria do processo**. São Paulo: Saraiva, 2006, 542 p.

SINMAZÇELIK, T *et al.* A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods. **Material and Design**. [S. L.], p. 3671-3685, ago. 2011

SLACK, R.; CHAMBERS, N.; JOHNSTON, S. **Admisnitração da Produção**. [S.I.]: Atlas, 2004, 748 p.

SOUZA, J. A. G. **Desempenho de Ferramentas Reafiadas - Furação**. 2011. 160 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Uberlândia, 2011.

SREENIVASULU, R.; RAOB, C. S.; RAVINDRA, K. Effect of thrust and torque exerted during drilling to optimize exit burr height and thickness by choosing variable drill bit geometry: A simplified theoretical model approach. **International Journal of Data and Network Science**. [S. L.], p. 43-56, 2020.

STORETEAU, R. L. **Fundamentos sobre Usinagem - Cavacos (Notas de Aula)**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2007, color.

STREAMMER, C. E. **Ferramentas de Corte II**. [S.I.]: Universidade Federal de Santa Catarina, 2005, 565 p.

SUNI, D. *et al.* Hole-making processes and their impacts on the microstructure and fatigue response of aircraft alloys. **Int J Adv Manuf Technol**. [S. L.], p. 1719-1726, dez. 2018.

SURI, R. **It's About Time: The Competitive Advantage of Quick Response Manufacturing**. New York: Productivity Press, 2010, 228 p.

SUTHERLAND, J.; SUTHERLAN, J. J. **Scrum: A arte de fazer o dobro do trabalho na metade do tempo**. [S. L.]: GMT Editores, 2019, 246 p.

TAVARES, C. S. **Seleção de Fornecedores sob Incertezas via Otimização Robusta**. 2019. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019.

UDDIN, M. *et al.* Evaluating Hole Quality in Drilling of Al 6061 Alloys. **Materials**. [S. L.], p. 2443, dez. 2018.

VERMA, B. B.; ATKINSON, L.; KUMAR, M. Study of fatigue behaviour of 7475 aluminium alloy. **Bulletin of Materials Science**. [S. L.], p. 231-236, abr. 2001.  
WILLIAMS, J. C.; STARKE, E. A. Progress in structural materials for aerospace systems. **Acta Materialia**. [S. L.], p. 5775-5799, dez. 2003.

XING, Y. *et al.* Entrepreneurial team and strategic agility: A conceptual framework and research agenda. **Human Resource Management Review**. [S. L.], p. 1-10, mar. 2020.

YOSHIO, Y. **Melhoria da produtividade na obtenção de ligas de alumínio aeronáutico com ferramentas de aço rápido**. 2010. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Campinas, 2010.