

MARCOS KENJI MARCONDES RESENDE

Análise do processo de furação do alumínio 7075-T651

Marcos Kenji Marcondes Resende

Análise do processo de furação do alumínio 7075-T651

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves

R433a	Resende, Marcos Kenji Marcondes Análise do processo de furação do alumínio 7075-T651 / Marcos Kenji Marcondes Resende – Guaratinguetá, 2018. 53 f : il. Bibliografia: f. 52-53 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2018. Orientador: Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves 1. Usinagem. 2. Ligas de alumínio. 3. Alumínio – Indústria. I. Título. CDU 621.9
-------	---

Luciana Máximo

Bibliotecária CRB-8/33595

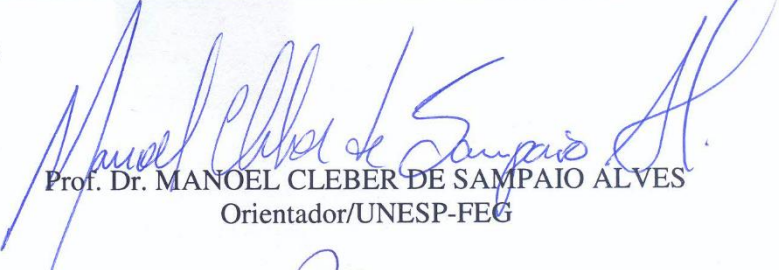
MARCOS KENJI MARCONDES RESENDE

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA


Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. MANOEL CLEBER DE SAMPAIO ALVES
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. CLEVERSON PINHEIRO
IFSP campus Jacareí-SP


Profa. Msc. SARAH DAVID MÜZEL
UNESP-FEG

Dezembro de 2018

RESUMO

As excelentes propriedades do alumínio permitem que ele tenha uma ampla aplicação na indústria, sendo um dos metais mais utilizados no mundo. Para a aplicação específica do alumínio é necessário a adição de elementos de liga para aprimorar suas propriedades, como a liga 7075-T651, que tem como principal elemento de liga o zinco. Por sua alta resistência mecânica é aplicada principalmente no setor aeronáutico, mais especificamente em estruturas e fuselagem. Para este fim a liga de alumínio 7075-T651 precisa passar pelo processo de furação para que se possa realizar a montagem estrutural dos componentes aeronáuticos. Variações no processo de furação permitem melhorar a qualidade dos furos, a diminuição de rebarbas e uma melhor precisão dimensional, portanto o objetivo deste trabalho é apontar as melhores condições para a furação do alumínio 7075-T651. Para isso foi feita a furação dos corpos de prova em um centro de usinagem e por meio de um arranjo fatorial completo foram testadas todas as relações possíveis das variáveis de entrada e realizada uma análise de variância (ANOVA) no *MiniTab* 17 para avaliar como cada variável de entrada afetou o valor final dos parâmetros de saída. Na avaliação final de todos os gráficos e análises de variância executados chegou-se à conclusão que a melhor condição de usinagem de furos em alumínio 7075-T651 se deu com a combinação da velocidade de corte de 80 m/min, da velocidade de avanço de 0,10 mm/rot e com a aplicação da MQF. Isso resultou numa rugosidade média de 0,409 μm e rugosidade total de 2,960 μm .

PALAVRAS-CHAVE: Usinagem. Força de corte. Vibração do sistema. Erro diametral.

ABSTRACT

The excellent properties of aluminum allow it to be widely used in the industry, being one of the most used metals in the world. For the specific application of the aluminum it is necessary the addition of alloying elements to improve its properties, like the alloy 7075-T651, that has as main element of alloy the zinc. Due to its high mechanical strength it is applied mainly in the aeronautical sector, more specifically in structures and fuselage. For this purpose the 7075-T651 aluminum alloy must pass through the drilling process in order to carry out the structural assembly of the aeronautical components. Variations in the drilling process allow to improve the quality of the holes, the reduction of burrs and a better dimensional accuracy, therefore the objective of this work is to point out the best conditions for the drilling of the 7075-T651 aluminum. For this purpose, the drilling of the test specimens was done in a machining center and by means of a complete factorial arrangement, all the possible relations of the input variables were tested and an analysis of variance (ANOVA) was performed on the MiniTab 17 to evaluate how each variable has affected the final value of the output parameters. In the final evaluation of all the analyzed graphs and analysis of variance, it was concluded that the best machining condition of 7075-T651 aluminum holes was achieved by combining the cutting speed of 80 m / min, 0.10 mm / rot and with the application of MQF. This resulted in an average roughness of 0.409 μm and total roughness of 2.960 μm .

KEYWORDS: Machining. Cutting force. Vibration of the system. Diametral error.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
2	OBJETIVOS	8
2.1	OBJETIVO GERAL.....	8
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
3.1	USINAGEM.....	9
3.2	FURAÇÃO	10
3.2.1	Rugosidade resultante do processo de furação	11
3.2.2	Metrologia final da peça em termos de diâmetro	13
3.2.3	Máxima amplitude de vibração mecânica.....	13
3.3	REFRIGERAÇÃO	14
3.3.1	Usinagem sem fluido de corte e/ou com MQF	15
3.3.1.1	Sistema de lubrificação com MQF	15
3.3.1.2	Corte a seco	15
3.4	POTÊNCIA E FORÇA NA FURAÇÃO	17
3.5	ALUMÍNIO.....	20
3.5.1	Sistema de designação de ligas de alumínio – Ligas trabalhadas	24
3.5.2	Liga de alumínio 7075-T651	28
4	MATERIAIS E MÉTODOS	30
4.1	MATERIAL UTILIZADO	30
4.2	MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS	30
4.2.1	Centro de usinagem.....	31
4.2.2	Dispositivo para fixação do corpo de prova	31
4.2.3	Célula de carga	32
4.2.4	Sensores de corrente.....	33
4.2.5	Sensores piezelétricos	33
4.2.6	Bloco de conectores e cabo de ligação.....	34
4.2.7	Placa de aquisição de dados.....	35
4.2.8	Aplicação de MQF.....	36
4.2.9	Conjunto de pinos padrão	37
4.2.10	Rugosímetro	37
4.2.11	Ferramenta.....	38

4.3	METODOLOGIA	38
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
6	CONCLUSÃO	52
	REFERÊNCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

As características físico-químicas do alumínio fazem com que ele tenha grande destaque em aplicações nos mais variados setores da engenharia, como nas indústrias automotiva, eletroeletrônica, aeronáutica, aeroespacial e de bens de consumo, bem como em estruturas, construção civil, transportes entre outros. As principais propriedades buscadas no alumínio são a baixa densidade, a elevada resistência à corrosão, a alta condutividade térmica e elétrica. Por conta disso é o metal não ferroso mais utilizado no mundo, segundo dados da ABAL - Associação Brasileira do Alumínio (2011).

Para atender a especificação de cada projeto e melhorar as propriedades do alumínio são adicionados outros elementos formando as ligas de alumínio. As ligas são divididas em diferentes séries, dependendo da composição química das mesmas. Segundo a ASTM – *American Society for Testing and Materials*, as séries são; 1xxx, 2xxx, 3xxx, 4xxx, 5xxx, 6xxx, 7xxx.

O alvo de interesse deste estudo é o alumínio 7075-T651. As ligas da série 7xxx são utilizadas principalmente na indústria aeronáutica devido à sua baixa densidade e boas características de usinabilidade. A liga de alumínio 7075-T651 é a liga de maior resistência, com alta tenacidade à fratura, sendo aplicada em estruturas de aeronaves, indústria militar, máquinas e equipamentos, etc.

Para a aplicação em fuselagens e estruturas de aeronaves faz-se necessário um estudo de métodos e técnicas de furação de chapas desse material. Tendo em vista que a furação é inerente ao procedimento de montagem e construção de componentes, pode-se dizer que a furação é um dos processos de usinagem mais empregados na indústria manufatureira. Diante disso, o acabamento superficial, o controle de rebarbas e a precisão dimensional são parâmetros determinantes na qualidade do furo.

Neste trabalho foram utilizadas como as variáveis de entrada: velocidade de corte, velocidade de avanço e condição de lubrificação; e obteve como parâmetros de saída: força axial, potência consumida e vibração. Além de analisar como o ajuste de cada variável influenciou nos resultados este estudo buscou verificar qual a condição ideal de corte para que o furo tivesse a menor rugosidade e, em segundo plano, o menor erro diametral, sendo esses dois fatores determinantes para uma boa qualidade de furo.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Identificar a melhor condição de corte no processo de furação do alumínio 7075-T651 para diferentes velocidades de corte, avanços e modos de lubrificação, utilizando broca de aço rápido sem revestimento.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar o comportamento do processo de furação para diferentes condições de corte, analisando a força axial, potência de corte e vibração;
- Realizar a análise qualitativa dos furos usinados no processo de furação;
- Analisar os resultados obtidos através da análise estatística para apontar a condição de corte que gerou melhores resultados na qualidade dos furos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 USINAGEM

Segundo Machado et al. (2012), a usinagem de materiais pode ser definida como um processo de fabricação que ocorre por meio da remoção de cavacos, ou seja, é uma operação que tem por objetivo modificar a forma do material, transformando-o em uma peça com forma, dimensões e acabamentos definidos, produzindo o cavaco. Nesta definição, o cavaco é o fragmento de material retirado da peça pela ferramenta.

Santos e Sales (2007) contribui para o assunto, caracterizando o processo de usinagem como a transformação da matéria-prima em produto acabado através da retirada de material na forma de cavacos. Essa remoção de cavacos pode se dar de duas formas distintas: usinagem convencional e não convencional. Na usinagem convencional, o cavaco é removido por cisalhamento por meio da ferramenta de corte. Os processos utilizados nesse tipo de usinagem são: torneamento, fresamento, alargamento, furação, rosqueamento, retificação, brochamento, etc. Na usinagem não convencional não existe uma ferramenta de corte que entra em contato com a peça. Os processos utilizados nesses tipos de usinagem são: ultrassom, laser, plasma, feixe de elétrons, etc.

O processo de usinagem é complexo e simples ao mesmo tempo, além de ser o mais flexível de todos os processos de fabricação. Complexo, pois é difícil definir as melhores condições de corte. Simples, porque ao conseguir determinar essas condições ideais de corte, o cavaco é formado de maneira correta, não sendo necessária nenhuma ação por parte do operador (MACHADO et al., 2012).

A complexidade apresentada pela operação de usinagem se deve à grande variedade de parâmetros que podem ser modificados resultando em infinitas combinações. Para superar tal complexidade do processo existem três formas: através das tentativas e erros, ou seja, da experiência; por meio de testes que geram custos elevados e não podem ser considerados válidos para todo processo semelhante; e, finalmente, através de modelos teóricos (MACHADO et al., 2012).

De acordo com Heber et al. (2007), o processo de furação convencional é o mais utilizado nas operações de usinagem nas indústrias de transformação, podendo chegar até a 50% do total de operações de usinagem em determinados países. A relevância desse processo pode ser analisada também pelo consumo de ferramentas, que é estimado em 250 milhões de brocas por

ano consumidas no mundo. Dentro deste contexto, esta é a principal motivação em se adotar este tema como objeto de estudo neste trabalho de graduação.

3.2 FURAÇÃO

O processo de furação é um dos processos de usinagem mais utilizados na indústria manufatureira. A grande maioria das peças de qualquer tipo de indústria tem, pelo menos, um furo e somente uma parte muito pequena dessas peças já vem com o furo pronto do processo de obtenção da peça bruta (fundição, forjamento, etc.) (DINIZ et al., 2013).

Dentre os processos de usinagem, a furação ocupa um lugar eminente tanto pela sua ampla utilização, quanto pela dificuldade das operações, sendo amplamente utilizada na indústria aeroespacial, automotiva e em diversos outros setores. É responsável por 40% de todos os processos de remoção de material devido à grande quantidade de furos necessários para montagem com rebites e parafusos. Por exemplo, mais de 100.000 furos são necessários na produção de uma única aeronave monomotor e mais de um milhão de furos são perfurados para fixação e montagem de fuselagens de aeronaves de grande porte (TSAO, 2008).

Segundo Bork (1995), a furação é um processo mecânico destinado à obtenção de um furo, geralmente cilíndrico, com auxílio de uma ferramenta multicortante. É um processo de usinagem com remoção de cavacos onde o movimento de corte é circular e o movimento de avanço é linear na direção do eixo de rotação da ferramenta.

O desempenho da furação e a qualidade do furo são críticos para a vida da peça que será juntada. Variações no processo de furação permitem melhorar a qualidade dos furos, a diminuição de rebarbas e uma melhor precisão dimensional (SANTOS; SALES, 2007).

O processo de furação utilizando brocas é considerado uma operação de desbaste e dessa forma pode ser necessário, em alguns casos, operações complementares para adequar o furo às características operacionais, como, por exemplo, maior precisão dimensional, maior precisão de forma e alinhamento e melhor acabamento (BORK, 1995).

Segundo Bork (1995), a furação possui algumas características peculiares ao seu processo:

- A velocidade de corte varia, ela reduz em direção ao centro da broca, ou seja, parte de um máximo na periferia e é nula no centro da broca;
- O fluido de corte tem as funções de lubrificante, refrigerante e serve ainda de meio de transporte para os cavacos formados na furação;
- É um processo que apresenta dificuldades no transporte de cavacos;

- As guias da ferramenta atiram com a parede da peça ao longo do processo;
- As brocas com cantos vivos estão mais sujeitas ao desgaste;
- Quanto maior a profundidade do furo, maior o atrito das guias no processo; e
- O calor na região de corte tem uma distribuição inadequada.

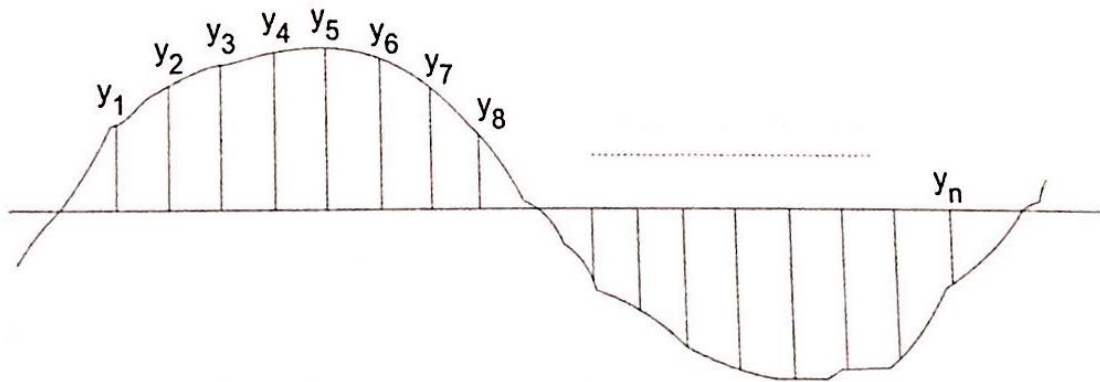
Com base nestas características, é possível se definir requisitos que devem ser adotados na verificação da qualidade de furação em um determinado processo mecânico. Neste trabalho, serão considerados os seguintes requisitos:

3.2.1 Rugosidade resultante do processo de furação

A avaliação da integridade superficial pode ser feita através da medição de rugosidade da superfície usinada. Esse parâmetro é a medida das irregularidades da superfície usinada ou dos erros microgeométricos consequências da ação do processo de usinagem. Está intimamente ligado à qualidade da peça após a usinagem. Durante o processo de usinagem podem ocorrer alterações na superfície ou em camadas subsuperficiais alterando o desempenho da peça fabricada como por exemplo, uma alta rugosidade pode diminuir a resistência à fadiga e a corrosão, ou provocar distorções (SANTOS; SALES, 2007).

Dessa forma, a rugosidade é parâmetro fundamental na avaliação da qualidade de uma superfície. Neste estudo serão considerados a rugosidade média (R_a) e a rugosidade total (R_t). Segundo Santos et al. (2007), a medida da rugosidade média é um fator muito propagado. Pode ser determinado pela média das distâncias entre os pontos da superfície e a linha de centro, conforme é representado na Figura 1. É um parâmetro de controle de processo, pois modificações em seu valor indicam alterações no processo, principalmente desgaste de ferramenta (MUMMERY, 1992 apud. DINIZ et al. 2011).

Figura 1 - Representação da derivação matemática de R_a



Fonte: Santos e Sales (2007).

Ainda para a avaliação da rugosidade média existem faixas de valores que são considerados aceitáveis para cada tipo de usinagem como segue no Quadro 1:

Quadro 1 - Faixas típicas de R_a (μm) para alguns processos de usinagem

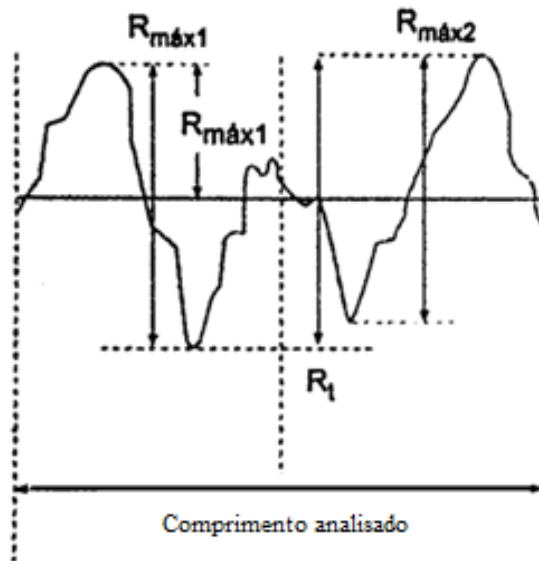
Processo	50	25	12,5	6,3	3,2	1,6	0,80	0,40	0,20	0,10	0,05	0,025	0,012
Furação													
Usinagem química													
Corrosão eletrolítica													
Fresamento													
Brochamento													
Alargamento													
Feixe de elétrons													
Laser													
Eletroquímico													
Tornamento/Mandrilhamento													
Barell finishing													
Esmerilhamento eletrolítico													
brunimento													
Esmerilhamento													
Honing													
Polimento Eletrônico													
Polimento													
Lapidação													
Super acabamento													

Campo de aplicação usual
 Aplicação menos comum

Fonte: Davim (2010) apud Müzel (2017).

A rugosidade total é a medida entre o vale mais baixo e o pico mais alto, sua medida é feita na perpendicular à linha de centro e em todo o comprimento analisado. A Figura 2 representa a medição da rugosidade total.

Figura 2 - Representação do parâmetro R_t



Fonte: Adaptado de Santos e Sales (2007).

A integridade superficial é alterada por muitos parâmetros de usinagem e, geralmente a rugosidade é menor quando: as deflexões causadas pelos esforços de usinagem ou vibrações são baixas; a ponta da ferramenta não é aguda; o material usinado não apresenta defeitos; arestas de corte em bom estado; a ferramenta e a peça estão ajustadas e centradas e ferramenta sem aresta postiça de corte (SANTOS; SALES, 2007).

3.2.2 Metrologia final da peça em termos de diâmetro

Um problema no uso das brocas helicoidais é a imprecisão dimensional, uma vez que a tolerância para este quesito é da ordem de IT11, ou seja, o erro máximo tolerado é da ordem de 0,075 mm (DINIZ et al., 2013; ABNT NBR 6158).

3.2.3 Máxima amplitude de vibração mecânica

A usinagem de materiais é considerada uma operação estável por conta dos parâmetros de entrada serem constantes, tais como a velocidade de corte, velocidade de avanço e ângulos de corte. Contudo este processo é bastante afetado pela dinâmica da operação de corte, onde os fenômenos vibratórios incidem sobre o sistema motivando a variação das forças envolvidas na usinagem (SANTOS, 2011).

De acordo com Santos (2011), para este estudo a vibração ocorrida durante o processo de furação pode causar um dano superficial no acabamento do furo usinado, bem como avarias nas brocas e se for contínua pode causar danos à máquina-ferramenta. Assim o fenômeno mais importante de vibração é a que ocorre entre a máquina e a peça que afeta diretamente a qualidade da peça final e conseqüentemente do processo em si (MÜZEL, 2017).

3.3 REFRIGERAÇÃO

O maior desejo da indústria manufatureira é executar os processos de usinagem sem a necessidade de usar fluídos para a lubrificação durante as operações, isso para reduzir os custos de fabricação das peças e dos produtos. Porém, durante o corte, uma grande quantidade de calor é gerada, resultado da energia necessária para a deformação do cavaco, além da energia gerada do atrito ferramenta-peça e cavaco-ferramenta. Assim sendo, a ausência deste fluído pode causar problemas na operação de usinagem e, conseqüentemente, na peça final (DINIZ et al., 2013).

A falta do fluído pode causar aumento excessivo da temperatura da ferramenta e da peça. Logo, este calor deve ser reduzido ou extraído da ferramenta e da peça com o objetivo de reduzir o desgaste, a dilatação térmica da peça e o dano na superfície da peça. O calor em excesso leva à queda do rendimento da ferramenta, diminuição da qualidade final da peça em alguns aspectos, como imprecisão dimensional ou geométrico, além do acúmulo de cavacos durante o processo, podendo ocorrer soldagem na ferramenta, o que levaria a um aumento de forças necessárias à realização do processo (DINIZ et al., 2013).

Dessa forma os fluidos de corte são necessários, pois agem como refrigerantes em altas velocidades de corte, onde a geração de calor é elevada, e como lubrificantes em baixas velocidades (DINIZ et al., 2013; SOUZA, 2016; ALLEGRI, 2014).

Segundo Diniz et al. (2013), o fluído de corte na função de refrigerante age no sentido de aumentar a vida útil da ferramenta de corte, um exemplo são as brocas de aço-rápido, que perdem seu poder de corte em temperaturas relativamente baixas em torno de 600°C. Outro benefício da ação refrigerante é conferir à peça melhor acabamento superficial e/ou tolerâncias dimensionais mais apertadas. Processos onde se necessitem de uma baixa rugosidade é primordial que haja uma ação lubrificante por parte do fluído de corte.

Nas operações envolvendo alumínio, o fluído como refrigerante garante uma proteção da peça, pois devido ao seu baixo ponto de fusão, o alumínio tende a se deformar por causa do

calor gerado, então o fluido tem o dever de minimizar o aquecimento da peça e, consequente, a deformação da mesma. (DINIZ et al. 2013).

Segundo Santos e Sales (2007), no processo de furação profunda, se o cavaco gerado não é contínuo, o fluido de corte tem papel fundamental no processo, pois cavacos fragmentados não têm a capacidade de percorrer os canais helicoidais das brocas e podem ficar presos na região de corte, podendo gerar a quebra da ferramenta de corte.

Na furação específica do alumínio, o cavaco formado geralmente é longo e facilmente adere na ferramenta, sendo assim, o fluido tem a função de evitar que o cavaco se prenda nos canais da broca, inibindo a formação de cavaco contínuo e impedindo assim a quebra da broca. Desta forma, as principais funções dos fluidos de corte são: servir de meio transportador para a remoção do cavaco da região de corte, redução do atrito entre ferramenta e cavaco, refrigeração da ferramenta e da peça em altas velocidades de corte, melhoria do acabamento superficial da peça (MACHADO et al., 2012).

3.3.1 Usinagem sem fluido de corte e/ou com MQF

Os fluidos de corte oferecem muitas vantagens aos processos de usinagem, porém também provocam alguns problemas, como dificuldade e custo alto para sua reciclagem e dos cavacos que entram em contato com ele, poluição ambiental e doenças nos operadores. Para isso, a indústria vem se esforçando para evitar ou reduzir ao máximo sua utilização nas operações de usinagem e, ao mesmo tempo, não diminuir os ganhos obtidos de vida útil das ferramentas e de qualidade da peça usinada. Para isso alguns aspectos devem ser observados, como parâmetros de corte adequados, ferramentas com baixo coeficiente de atrito, com alta dureza a quente e estabilidade química (DINIZ et al., 2013).

A forma como o fluido de corte é aplicado na operação de usinagem é de grande importância, pois pode ser um componente que melhore o processo ou um gerador de problemas, como uma baixa qualidade no acabamento até uma quebra de ferramenta.

O fluido de corte pode ter sua aplicação feita em diferentes direções, ou seja, diretamente na ferramenta, na peça ou em ambas. Sendo assim, os métodos de aplicação podem ser divididos em três, que são: jorro a baixa pressão ou por gravidade, sistema de alta pressão ou mínima quantidade de fluido – MQF. O jato de fluido a baixa pressão ou por gravidade é um dos mais usados por conta da sua simplicidade. O fluxo de fluido pode ser direcionado contra a superfície superior do cavaco ou diretamente na saída da ferramenta (Figura 3). O consumo de fluido é normal (SANTOS; SALES, 2007).

Segundo Santos e Sales (2007), no sistema de alta pressão o objetivo é melhorar a quebra do cavaco, dessa forma um jato de fluido a alta pressão é lançado, entretanto é mais complexo devido aos equipamentos necessários para gerar a alta pressão, além de ter um consumo muito maior que o anterior.

Figura 3 - Jato de fluido a baixa pressão no processo de furação



Fonte: Souza (2016).

3.3.1.1 Sistema de lubrificação com MQF

Segundo Santos e Sales (2007), a área de contato entre o cavaco e a ferramenta é muito pequena, o que sugere a necessidade de pouca quantidade de fluido, ou seja, vazão de fluido baixa. Assim, surgiu o método de lubrificação com a mínima quantidade de fluido (MQF), que é um procedimento onde é pulverizada uma quantidade mínima de óleo (menos de 60 ml/h) em um fluxo de ar comprimido. A mistura ar-óleo gerada no processo muitas vezes tem maior poder de lubrificação da região de corte do que capacidade de refrigeração.

De acordo com Diniz et al. (2013), um exemplo de sucesso da aplicação da MQF é a furação das ligas de alumínio. Pela alta ductilidade do alumínio, já nos primeiros furos sem fluido de corte, o cavaco removido adere aos canais da broca provocando seu entupimento e na maioria das vezes ocorre a quebra da mesma.

Segundo DINIZ et al. (2013), ensaios realizados em ligas de alumínio-silício mostraram que, tanto com MQF quanto com fluxo abundante de óleo, o desgaste da broca não teve diferença significativa e os índices de qualidade da peça, como tolerância dimensional, geométrica e de rugosidade, também não foram prejudicados com a aplicação da MQF. Uma ressalva deve ser feita à MQF na questão ambiental do processo, mesmo que a quantidade de fluido utilizada seja menor que em outros processos, alguns pontos devem ser observados. São eles:

- *Poluição ambiental* – a pulverização do fluido levanta no ambiente de trabalho uma névoa de óleo, dessa forma é necessário o encapsulamento da máquina-ferramenta e um sistema de exaustão eficiente.
- *Consumo* – este modo de aplicação de fluido é considerado sem retorno, uma vez que o fluido transformado em névoa é totalmente perdido. Dessa forma, o consumo de fluido na operação de usinagem deve ser considerado.
- *Barulho* – para realizar a pulverização do óleo é utilizada uma linha de ar comprimido que funciona durante toda a execução do processo de usinagem. As linhas de ar comprimido geram um barulho excessivo, poluindo o ambiente e dificultando a comunicação.

3.3.1.2 Corte a seco

Uma alternativa ao uso de lubrificante ou MQF é o corte a seco. Na usinagem a seco, não se observam as funções básicas dos fluidos de corte: refrigeração, lubrificação e remoção/transporte de cavacos. Desta forma, exige-se uma adequação dos parâmetros de usinagem que influenciam no processo de usinagem: características da peça, material da ferramenta, material da peça a ser usinada, processo e condições de corte (SANTOS; SALES, 2007).

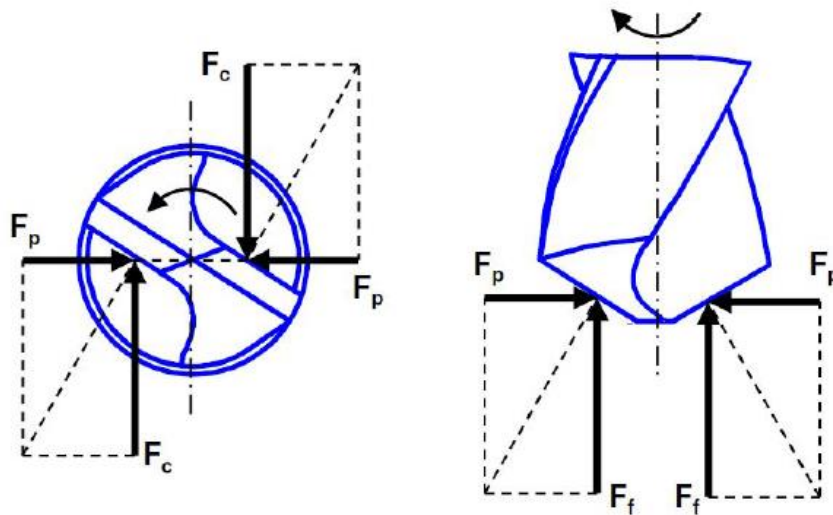
De acordo com Santos e Sales (2007), ferramentas de corte mais modernas estão em desenvolvimento para suportar altas temperaturas na região de corte, sem perder a dureza e a resistência ao desgaste. Sendo possível aumentar a produtividade com o processo de usinagem a seco, pois o custo com o fluido é eliminado e, o tempo e o custo com a manutenção são reduzidos. Existem algumas dificuldades na usinagem a seco, como controle da qualidade da peça final, controle da distribuição de calor, etc.

3.4 POTÊNCIA E FORÇA NA FURAÇÃO

O conhecimento da força de usinagem envolvida no processo de furação é de grande interesse para a determinação das melhores condições de corte, para conhecer a precisão do conjunto máquina-ferramenta nas diferentes condições de trabalho e também saber como é a usinabilidade de um material em relação à uma dada ferramenta (BORK, 1995).

Segundo Bork (1995), “A força de usinagem atuante sobre a cunha cortante no processo de furação é decomposta em três componentes: força principal de corte (F_c), força de avanço (F_f) e força passiva (F_p)” (BORK, 1995, p31), conforme a Figura 4:

Figura 4 - Forças atuantes na aresta principal de corte



Fonte: Sousa (2011).

Força de corte (F_c) é a componente que age em cada gume cortante e é proporcional à resistência do material que está sendo furado além de ser encarregado diretamente pelo valor do momento torçor na furação (STOETERAU, 2004). Na Equação 1 é apresentado o cálculo da força de corte em cada aresta de corte:

$$F_c = k_c \frac{f \cdot D}{4} \quad [\text{N}] \quad (1)$$

Em que:

F_c = Força de corte [N]

k_c = Pressão específica de corte [N/mm²]

f = Avanço [mm]

D = Diâmetro da broca [mm]

A resistência ao corte no sentido do avanço (entrada da ferramenta) é que causa a força de avanço (F_f) e a aresta transversal é a principal responsável pelo seu surgimento, quando está com corte deficiente (SOUSA, 2011). A Equação 2, indica o cálculo da força de avanço:

$$F_f = k_f \frac{f \cdot D \cdot \sin(\sigma/2)}{4} \quad [\text{N}] \quad (2)$$

Em que:

F_f = Força de avanço [N]

k_f = Pressão específica de avanço [N/mm^2]

f = Avanço [mm]

D = Diâmetro da broca [mm]

De acordo com Sousa (2011), ao longo do processo de furação a aresta transversal extruda (esmaga) o material para as arestas principais. Esta deformação plástica causada pela aresta transversal no material é afeta a resistência ao avanço na furação. Dessa maneira, saber o valor da força de avanço é primordial para garantir que o eixo da máquina de furar conseguirá executar a operação de furação.

A resistência dos materiais ao avanço, na furação, é motivada pelo comprimento e ângulo da aresta transversal. A diminuição do comprimento da aresta transversal, geralmente, causa um decréscimo da força para deformar o material, reduz a temperatura na furação, aumenta a vida da broca e melhora o acabamento. Para o alumínio a variação do comprimento da aresta transversal não causa grande alteração na força de avanço (SOUSA, 2011; BORK, 1995).

A força passiva (F_p) que age nas duas arestas principais se anulam, em consequência da simetria das arestas principais com relação ao eixo principal da broca, sendo assim seu valor é desprezível comparado aos valores da força de avanço e força de corte. Porém uma não simetria pode gerar forças passivas diferentes em cada aresta principal, podendo causar flexão da broca (STOETERAU, 2004).

O momento troçor (M_t) é o resultado das componentes de força que agem nas arestas principais da broca, essa parcela é de 70 a 90% do valor total do momento (SOUSA, 2011). A Equação 3, representa o cálculo do mesmo.

$$M_t = F_c \frac{D}{2000} \quad [\text{N.mm}] \quad (3)$$

Em que:

M_t = Momento torçor [N.mm]

F_c = Força de corte [N]

D = Diâmetro da broca [mm]

Conhecendo o momento torçor é possível calcular a potência de corte que é a resultante do produto entre o momento torçor e a velocidade angular da ferramenta. A Equação 4, representa o cálculo da potência da corte (P_c):

$$P_c = \frac{M_t \cdot n}{9,549} \quad [\text{kW}] \quad (4)$$

Em que:

P_c = Potência de corte [kW]

M_t = Momento torçor [N.mm]

n = Rotação [rpm]

3.5 ALUMÍNIO

Para a escolha do tipo de material a ser utilizado em uma determinada aplicação existem algumas características que devem ser analisadas e levadas em conta, como por exemplo, as propriedades físicas e químicas, além das propriedades mecânicas como dureza, ductilidade, condutividade térmica e resistência à tração. Essas características são de extrema importância para que o material escolhido atenda às necessidades de projeto e também para que se aproveite ao máximo as características do material.

O alumínio, em função de ter grande afinidade com o oxigênio, não é encontrado livre na natureza, ele é encontrado na natureza através, principalmente, do minério chamado bauxita e, para que sua extração seja viável, a bauxita deve conter, no mínimo, 30% de alumina disponível. O alumínio representa 8% dos metais presentes na natureza e dessa forma é o terceiro metal mais abundante. (CALLISTER, 2007).

As excelentes características físico-químicas do alumínio fazem com que o mesmo seja aplicado em diversos setores da engenharia, como nas indústrias automotiva, eletroeletrônica, aeronáutica, aeroespacial e de bens de consumo, bem como em estruturas, construção civil, transportes entre outros. Suas propriedades mais destacadas são a baixa densidade, a elevada resistência à corrosão, a alta condutividade térmica e elétrica, por conta disso é o metal não ferroso mais utilizado no mundo, segundo dados da ABAL - Associação Brasileira do Alumínio (2011).

Por possuir tais características é um dos metais com maior versatilidade de aplicações, economicamente viável e muito atrativo para os diversos setores da engenharia. Pode ser utilizado como metal puro ou em forma de ligas quando combinado com outros elementos (ZANGRANDI, 2008).

Em seu processo de extração, o alumínio primário obtido contém algumas impurezas provenientes do processo, sendo que as mais comuns são os elementos de ferro e silício, além de outros elementos em menores proporções como o Cu, Mn, Ni, Zn, Ti e V (ZANGRANDI, 2008).

Determinadas aplicações exigem um grau de pureza alto do alumínio e para isso, em geral, é feito um processo de refino para a retirada de impurezas. Um exemplo para o uso do alumínio com alta pureza é na indústria de semicondutores e na fabricação de folhas finas de capacitores eletrolíticos (BRANDT, 1990). O alumínio com grau de pureza menor pode ser usado na indústria elétrica, de móveis, de eletrodomésticos, de brinquedos, de utensílios de cozinha e de embalagens.

Para classificar o alumínio, segundo seu grau de pureza, é usual utilizar a seguinte classificação, mostrada na Tabela 1:

Tabela 1 - Graus de pureza do alumínio e respectivas designações

Graus de pureza (%)	Designação
99,50 a 99,79	Pureza comercial
99,80 a 99,949	Alta pureza
99,950 a 99,9959	Super puro
99,9959 a 99,9990	Extrema pureza
Acima de 99,9990	Ultra pureza

Fonte: Zangrandi (2008).

As propriedades mecânicas do alumínio sofrem grande influência do grau de pureza do alumínio, conforme indicado na Tabela 2.

Tabela 2 - Efeito do grau de pureza do alumínio sobre as propriedades mecânicas de tração

Grau de pureza (%)	Tensão de escoamento σ_e (MPa)	Tensão de tração σ_t (MPa)	Deformação ε (%)
99,99	10	45	50
99,80	20	60	45
99,60	30	70	43

Fonte: Zangrandi (2008).

As especificações necessárias para cada projeto exigem propriedades mecânicas e físicas particulares que podem ser obtidas com o alumínio e suas ligas, dessa forma existem mais de 300 ligas conhecidas e muitas outras ligas especiais desenvolvidas para um determinado projeto. O alumínio e suas ligas têm uma classificação particular que foi estabelecida em 1971 pela *Aluminium Association*, que é o mais utilizado, conforme indicado no Quadro 2.

Quadro 2 - Séries de ligas de alumínio, principais constituintes e aplicações

Série	Composição Química	Principais Aplicações
1XXX	Al comercialmente puro	Contatos elétricos, Alclad
2XXX	Al-Cu e Al-Cu-Mg	Indústria aeronáutica
3XXX	Al-Mn e Al-Mn-Mg	Latas de bebidas, painéis
4XXX	Al-Si	Metal de adição para soldas, pistões, forjados de motores
5XXX	Al-Mg	Aplicações náuticas (Navios e barcos)
6XXX	Al-Mg-Si	Perfis arquitetônicos, componentes automotivos
7XXX	Al-Zn-Mg e Al-Zn-Mg-Cu	Indústria aeronáutica
8XXX	Outras ligas (Al-Li, Al-Fe)	Diversas e Variadas

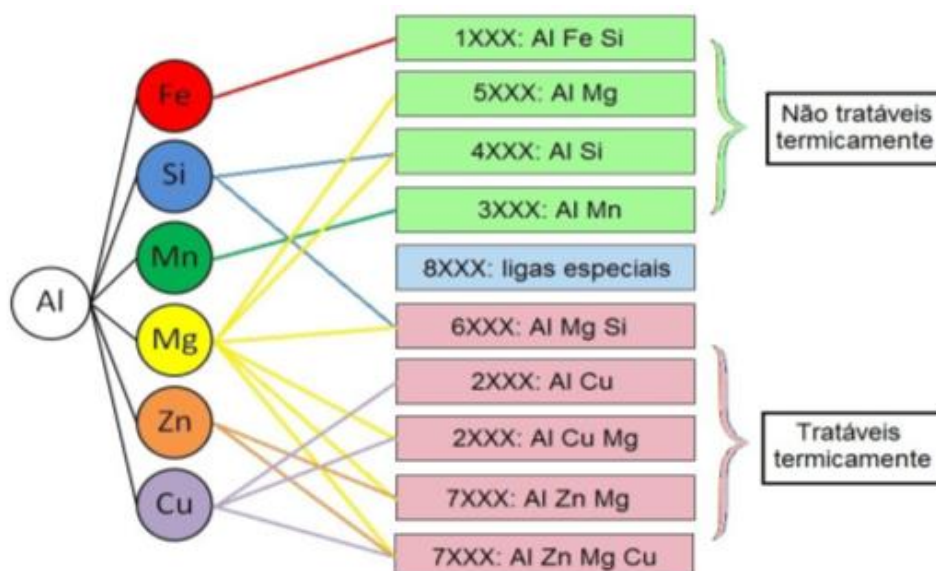
Fonte: Yoshikawa (2011).

Para aplicações estruturais, o alumínio necessita que sejam adicionados outros elementos para melhorar suas propriedades mecânicas. Assim sendo, as ligas de alumínio têm um campo de aplicação muito maior que a do metal puro. Hoje existem mais de 300 ligas reconhecidas no mercado e diversas outras que são desenvolvidas para projetos e necessidades específicas. As ligas de alumínio podem ser aplicadas nos mais variados setores da indústria como a indústria

automobilística, a aeronáutica, a naval; na construção civil; setor de embalagens, entre outras (ZANGRANDI, 2008).

Observa-se pela Figura 5 as combinações do alumínio com os principais elementos de ligas comerciais, o zinco, o magnésio, o cobre, o manganês e o silício; e as respectivas ligas:

Figura 5 - Principais tipos de associação de elementos de liga



Fonte: Barros (2013).

De acordo com Zangrandi (2008), cada elemento de liga que pode ser adicionado ao alumínio confere à liga gerada uma alteração na característica em relação ao alumínio puro, seguem alguns exemplos:

- O zinco aumenta consideravelmente a resistência mecânica do alumínio, pois proporciona endurecimento por precipitação natural e artificial da liga;
- O cobre também aumenta a resistência mecânica e permite o endurecimento por precipitação natural, mas reduz a soldabilidade, a ductilidade e a resistência à corrosão;
- O magnésio diminui a temperatura de fusão, aumenta a capacidade de endurecimento por deformação e a resistência à corrosão em ambiente salino;
- O silício reduz a temperatura de fusão, aumenta a fluidez, aumenta a resistência mecânica e melhora a ductilidade;
- O manganês confere à liga um aumento na resistência mecânica, reduzindo muito pouco a ductilidade, além de melhorar a resistência à corrosão.

Para aplicações específicas as ligas de alumínio podem ser formadas com elementos como níquel, cobalto, cromo, titânio e zircônio. Existem ainda os elementos indesejados em uma liga

de alumínio com o ferro e o chumbo (ZANGRANDI, 2008). A liga de alumínio com níquel possui uma maior resistência em altas temperaturas; o titânio reduz o tamanho dos grãos; o cromo aumenta a resistência à corrosão.

As ligas de alumínio são classificadas em dois grupos, baseados no processo de fabricação. Existe o grupo das ligas trabalhadas ou dúcteis e o grupo das ligas fundidas. Esses dois grupos ainda possuem dois outros subgrupos: as ligas tratáveis termicamente e as ligas não tratáveis termicamente, sendo que cada grupo tem sua classificação que será discutida a seguir.

3.5.1 Sistema de designação de ligas de alumínio – Ligas trabalhadas

Na série 1xxx, o primeiro dígito indica que o alumínio é comercialmente puro e sua composição é controlada. Os dois últimos dígitos indicam a porcentagem que ultrapassa os 99%. Por exemplo:

- Liga 1050: 99,50% de Al;
- Liga 1080: 99,80% de Al.

Já o segundo dígito, se igual a zero, indica que é a primeira liga registrada da série, ou seja, sem nenhuma modificação, mas se o segundo dígito for diferente de zero (1 a 9), é sinal de que existem modificações de uma ou mais impurezas.

Nas ligas trabalhadas das séries de 2xxx a 8xxx, os dois últimos dígitos não têm significado, servem apenas para diferenciar cada liga. O primeiro dígito indica qual é o principal elemento constituinte da liga e o segundo dígito indica as modificações da composição inicial da liga, exatamente como na série 1xxx (ZANGRANDI, 2008).

Conforme Miyahara (2015), as características das ligas trabalhadas em cada um dos tipos de séries são descritas a seguir:

- *Série 1xxx*: representa o alumínio comercialmente puro, não ligado, ou seja, sem adição de elementos de liga, que possui características como alta conformabilidade, resistência à corrosão e boa condutividade elétrica e térmica, além de baixa resistência mecânica e alta ductilidade. Tem ainda como característica pureza igual ou superior à 99%. Geralmente é utilizado onde a característica do projeto exija elevada resistência à corrosão, alta conformabilidade e/ou condutividade elétrica, assim sendo, é amplamente aplicado nas indústrias química, trocadores de calor, condutores elétricos e capacitores.

- *Série 2xxx*: o cobre é o elemento de liga com maior porcentagem presente e, o magnésio é o elemento secundário. A série 2xxx é tratável termicamente e possui ligas com combinações de alta resistência, principalmente em temperaturas elevadas, tenacidade, boa soldabilidade e não resistentes à corrosão atmosférica, dessa forma geralmente são pintados ou folheados. Possui boa usinabilidade, porém sua soldabilidade é limitada por este motivo são normalmente aparafusadas ou rebitadas. Suas principais aplicações são para estruturas de aeronaves (liga 2024 e 2017), para carroceria de caminhões (liga 2014), para a indústria aeroespacial (ligas 2219 e 2048), bem como para a suspensão de automóveis.
- *Série 3xxx*: o principal elemento de liga é o manganês. As ligas da série 3xxx não são tratáveis termicamente, porém apresentam uma resistência superior em relação às da série 1xxx. Outras características são a excelente resistência à corrosão e boa soldabilidade. Existem poucas ligas dessa série por conta da baixa solubilidade do manganês no alumínio. As ligas 3003, 3004 e 3105 são amplamente utilizadas na indústria. As aplicações dessas ligas são em latas de bebidas, para armazenamento de produtos químicos e alimentícios, telhados, chapas e tubos de trocadores de calor.
- *Série 4xxx*: são consideradas não tratáveis termicamente, seu principal elemento de liga é o silício. Suas ligas podem ser utilizadas na fabricação de pistões forjados, como metais de adição para arames de solda. Estas ligas têm amplo uso na fundição, pois seu elemento de liga principal, o silício, confere à liga uma melhor fluidez, que permite ao alumínio líquido fluir melhor através das cavidades do molde de fundição, garantindo a produção de formas mais complexas. Além disso, reduz a contração durante o resfriamento, diminui a porosidade das peças fundidas, reduz o coeficiente de expansão térmica e melhora a soldabilidade.
- *Série 5xxx*: o principal elemento de liga da série é o magnésio. Ligas desta série possuem excelente resistência à corrosão mesmo em ambiente salino, alta tenacidade mesmo em temperaturas muito baixas e boa soldabilidade, e resistência moderada. Estas ligas são endurecíveis por deformação. Ligas 5xxx encontram ampla aplicação na construção civil, em estruturas de rodovias como pontes, em tanques de armazenamento e vasos de pressão, tanques e sistemas para temperaturas muito baixas chegando até -270°C e aplicações em atmosfera marinha. Outro foco de sua aplicação é na arquitetura e decoração, embalagens e acabamentos brilhantes.

- *Série 6xxx*: o magnésio e o silício são os principais constituintes das ligas de alumínio 5xxx. São ligas tratáveis termicamente, entre suas características se destaca a alta resistência à corrosão, resistência moderada, boa ductilidade e são facilmente soldadas. Uma característica única desta série é sua capacidade de extrusão, o que as torna a primeira escolha em projetos arquitetônicos e estruturais. A liga 6063 é a mais utilizada pela sua capacidade de extrusão. Utilizadas em estruturas, carrocerias de caminhão, vagões ferroviários, oleodutos.
- *Série 7xxx*: ligas tratáveis termicamente, tendo como principal elemento de liga o zinco. Dentre suas características estão a alta resistência mecânica, quando adicionados à liga, o magnésio e o cobre apresentam a maior resistência mecânica entre todas as ligas. O campo de aplicação maior é no setor aeronáutico, onde os projetos exigem alta tenacidade e resistência mecânica. Não são ligas com boas características para a soldagem e por isso são normalmente rebitadas. Não possuem resistência à corrosão elevada, por isso são geralmente revestidas se necessário.
- *Série 8xxx*: envolvem um grande número de composições, com uma miscelânea de elementos de liga. As ligas conformadas contendo Li (2,4% a 2,8%) foram desenvolvidas para uso aeroespacial e criogenia.

As ligas de alumínio podem receber tratamentos térmicos para que suas características sejam aprimoradas ou para modificar suas propriedades de maneira conveniente para um determinado projeto. Algumas designações de tratamentos térmicos básicos que podem ser aplicados as ligas trabalhadas, são apresentados no Quadro 3 a seguir:

Quadro 3 - Designação dos tratamentos térmicos aplicados às ligas de alumínio trabalhadas

Tratamento	Significado
F	Conforme fabricada. Indica que não houve controle especial sobre os parâmetros térmicos do processo a quente, a frio ou sobre as condições de endurecimento
O	Recozida. Indica que o produto foi tratado termicamente para se obter os menores valores de resistência mecânica.
W	Solubilizada. Indica uma condição instável, após o resfriamento rápido da liga. Aplica-se somente para as ligas que endurecem por envelhecimento natural (na temperatura ambiente) e deve ser indicado o tempo de envelhecimento (por exemplo W ½ h).
T	Tratada termicamente. Indica uma condição estável após a solubilização, diferente daquelas obtidas por meio dos tratamentos “F” ou “O”. A letra T é sempre seguida por um dígito (inteiro de 1 a 10), para indicar a sequência dos tratamentos básicos.

Fonte: Zangrandi (2008).

As designações dos tratamentos térmicos básicos aplicáveis para o endurecimento por precipitação das ligas de alumínio trabalhadas das séries 2xxx, 6xxx, 7xxx e algumas da série 8xxx, são apresentadas no **Erro! Fonte de referência não encontrada.** abaixo:

Quadro 4 - Designação dos tratamentos térmicos aplicáveis para o endurecimento por precipitação

Tratamento	Significado
T1	Processamento a quente seguido de envelhecimento natural.
T2	Processamento a quente, trabalho a frio seguido de envelhecimento natural.
T3	Solubilização, trabalho a frio seguido de envelhecimento natural.
T4	Solubilização seguida de envelhecimento natural.
T5	Processamento a quente seguido de envelhecimento artificial.
<u>T6</u>	<u>Solubilização seguida de envelhecimento artificial.</u>
T7	Solubilização seguida de superenvelhecimento ou estabilização.
T8	Solubilização, trabalho a frio seguido de envelhecimento artificial.
T9	Solubilização, envelhecimento artificial seguido de deformação a frio.
T10	Processamento a quente, trabalho a frio seguido de envelhecimento artificial.

Fonte: Adaptado de Zangrandi (2008).

As variações dos tratamentos apresentados anteriormente normalmente são acrescidos de 1 até 3 dígitos após o primeiro que segue junto à designação básica, ou seja, T1x, T2xx, T3xxx, por exemplo.

Neste trabalho será utilizado o tratamento térmico T6, que é um tratamento térmico aplicado as ligas de alumínio em que é realizado a solubilização seguida do envelhecimento artificial.

A solubilização tem como objetivo dissolver as partículas de segunda fase solúveis, maximizar a taxa de difusão e a solubilidade dos elementos de liga no alumínio em altas temperaturas, em geral, próximas da temperatura do eutético ou acima da linha *solvus* do programa de fases para, em seguida, obter-se uma solução sólida supersaturada com esses elementos após um resfriamento rápido até a temperatura ambiente. [...] O processo de envelhecimento artificial é realizado em temperaturas acima da temperatura ambiente, para as quais a difusão é mais rápida. A taxa de difusão no início do processo é alta e diminui na sua fase final, quando a solução supersaturada tende para um estado de equilíbrio (ZANGRANDI, 2008, p. 53).

Para a realização do processo de precipitação artificial, as temperaturas variam na faixa de 95°C a 205°C associado a tempos longos. Esses dois fatores dependem do tipo de liga. Para a condição T6, a liga de alumínio 7075 tem um intervalo de temperatura que varia de 115°C a 130°C, porém a temperatura recomendada é de 120°C e o seu tempo nessa condição é de 12h a 24h (ZANGRANDI, 2008).

Segundo Zangrandi (2008), apesar dos parâmetros recomendados para a liga 7075, uma forma de acelerar o processo e garantir as propriedades com o envelhecimento artificial é realizar o mesmo em duas etapas, a primeira realizada a 100°C por 4 horas e a segunda etapa a 160°C durante 8 horas, que conferem as mesmas propriedades mecânicas da condição T6, realizada a 120°C durante 24 horas.

O tempo de permanência em temperatura ambiente antes do tratamento de precipitação, em ligas da série 7xxx, é um parâmetro essencial a ser observado, pois se o tempo correto não for observado pode ocorrer queda acentuada da tensão de escoamento e da resistência à tração após o tratamento de envelhecimento artificial. Dessa forma, para a liga 7075 o tempo de permanência em temperatura ambiente, não pode exceder 4 horas.

As vantagens do envelhecimento artificial, comparado ao envelhecimento natural, não se limita ao aumento da taxa de difusão apenas, mas se estende para as propriedades mecânicas da liga, em função das variações na microestrutura serem diferentes em temperaturas elevadas.

3.5.2 Liga de alumínio 7075-T651

As ligas de alumínio da série 7xxx têm aplicações importantes em transportes aéreos comerciais e militares devido ao seu peso leve associado à alta resistência e boas características de usinabilidade.

A liga de alumínio 7075 na condição T651 é formada por uma solução sólida tratada termicamente e artificialmente envelhecida, seguida por estiramento para alívio de tensões internas, este estiramento deve ser subsequente à solubilização para que não exista nenhum envelhecimento natural. É a liga de alumínio de maior resistência, possuindo alta tenacidade à fratura e baixo nível de rachadura por fadiga e, portanto, é ideal desde a indústria automobilística até a indústria aeronáutica, especialmente em estruturas das aeronaves, incluindo a fuselagem e o revestimento da asa, indústria militar, máquinas e equipamentos, moldes para injeção de plástico e desenvolvimento de ferramentas (ZANGRANDI, 2008).

Esta liga apresenta problemas de corrosão sob tensão e apresenta baixas propriedades superficiais de dureza, resistência ao desgaste e estabilidade química. Tem como principal

elemento de liga o zinco variando de 5,1% a 6,1% de peso, o que possibilita realizar tratamentos térmicos por solubilização e envelhecimento (CAVALCANTE, 2016). Juntamente com o zinco, outros elementos de liga estão presentes nesta liga de alumínio, tais como silício, ferro, cobre, manganês, magnésio, cromo, titânio e zircônio. No Quadro 5 é apresentado a composição máxima em porcentagem de cada elemento presente na liga de alumínio 7075.

Quadro 5 - Limites de composição química da liga de alumínio 7075

Liga	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn		Ti	Outros	Al
										cada	Total
075	0,40	0,50	1,2-2,0	0,30	2,1-2,9	0,18-0,28	5,1-6,1	0,25Zr + Ti	0,20	0,05	Restante

Fonte: ABAL (1990).

É importante conhecer o efeito dos principais elementos na liga de alumínio 7xxx. O zinco, isoladamente, torna as ligas suscetíveis à fratura a quente e à fratura por corrosão; contudo, na proporção de 3% a 7,5% e combinado com o magnésio, forma os precipitados $MgZn_2$ com grande resposta ao tratamento térmico, gerando-se, assim, uma liga de grande resistência mecânica, como ocorre com as ligas da série 7xxx. O cobre, em teores de 2% a 10%, melhora o processo de solubilização/envelhecimento, aumentando a resistência mecânica e a dureza e diminuindo o alongamento da liga. Combinado com o Mg, aumenta a resistência após solubilização e têmpera e diminui a resistência à corrosão das ligas Al-Zn-Mg (DAVIS, 2002 apud ZANGRANDI, 2008).

O manganês aumenta a resistência do alumínio, tanto na solução sólida quanto em fase intermetálica finamente dispersa, além de atuar como refinador de grãos, também trabalha para aumentar a taxa de envelhecimento da liga (OLIVEIRA, 2016; ZANGRANDI, 2008).

Sendo assim as ligas Al-Zn contendo os elementos magnésio e cobre, adicionadas de cromo e manganês ou zircônio, mais ferro e silício, que estão sempre presentes, têm as características necessárias para a aplicação na indústria aeronáutica (CAVALCANTE, 2016).

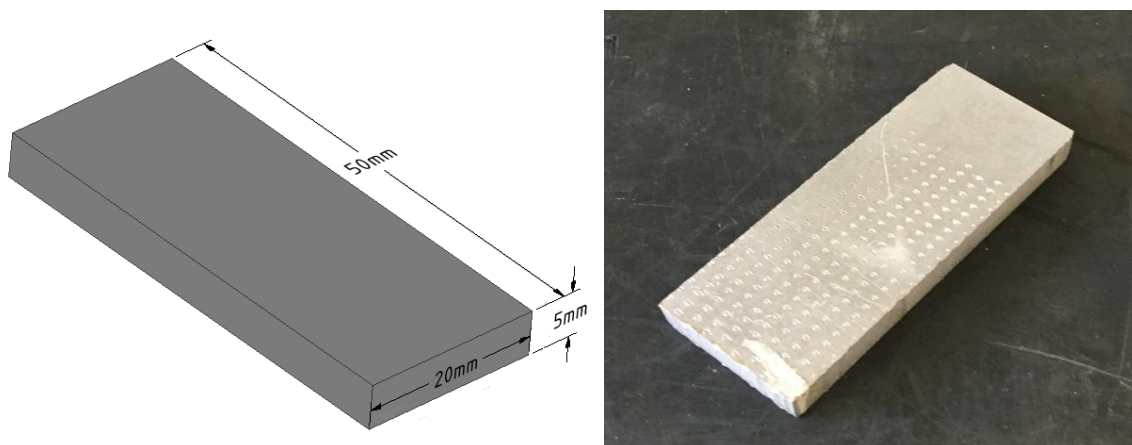
4 MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir serão detalhados os materiais e os equipamentos utilizados para a realização deste estudo, além das ferramentas e das técnicas empregadas para a realização dos testes e medições. Os métodos para coleta de dados relevantes ao estudo bem como o tratamento e análise desses dados também serão abordados neste tópico.

4.1 MATERIAL UTILIZADO

Para a realização dos ensaios foram utilizados 36 corpos de prova da liga de alumínio 7075-T651. Os corpos de prova foram cortados com as dimensões 50 mm x 20 mm x 5 mm para uma melhor fixação na máquina (Figura 6).

Figura 6 - Corpo de prova de alumínio 7075-T651



Fonte: Produção do próprio autor.

4.2 MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS

A Unesp disponibilizou todas as máquinas e equipamentos necessários para a realização dos ensaios. Os meios empregados nos ensaios são dos laboratórios da FEG – Unesp *campus* Guaratinguetá. A seguir elencamos todos os equipamentos essenciais para a execução do processo bem como para a aquisição de dados confiáveis para a posterior análise dos resultados.

4.2.1 Centro de usinagem

Os corpos de prova foram submetidos ao processo de furação no centro de usinagem da marca DMG modelo DMU50ECO série DMG *Ecoline*, ilustrado na Figura 7 com as seguintes características:

- Dimensões (comp x larg x alt) 2206 mm x 2829 mm x 2426 mm;
- Dimensão da mesa 630 mm x 500 mm;
- Potência de 17 kVA;
- Capacidade do armazém de ferramentas: 16 ferramentas;
- Velocidade de rotação 8000 rpm;
- Velocidade máxima de avanço 12 m/min;
- Peso máximo da mesa 200 kg.

Figura 7 - Centro de usinagem marca DMG modelo DMU50ECO série *Ecoline*

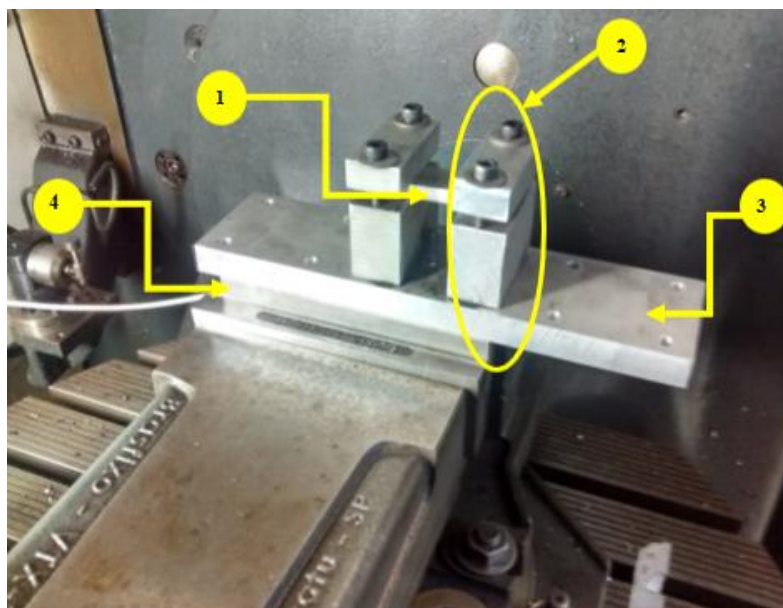


Fonte: Müzel (2017).

4.2.2 Dispositivo para fixação do corpo de prova

Para realizar a furação foi necessário um dispositivo para prender o corpo de prova e ao mesmo tempo fazer a coleta de dados durante cada ensaio. Assim, foi utilizado o dispositivo representado pela **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, localizado dentro do centro de usinagem.

Figura 8 - Dispositivo para a fixação do corpo de prova



Fonte: Produção do próprio autor.

Sendo:

- 1) Corpo de prova;
- 2) Dispositivo de fixação;
- 3) Base do dispositivo de fixação;
- 4) Célula de carga.

4.2.3 Célula de carga

Na base do dispositivo fica localizado uma célula de carga para a captação da força axial, que foi aplicada durante cada um dos 36 ensaios realizados. A célula de carga, Figura 9, é da marca *BERMAN load cells*, modelo TBSPL com capacidade máxima de 25 kg. As características desta célula de carga estão representadas no Quadro 6.

Figura 9 - Célula de carga modelo TBSPL



Fonte: Allegrini (2014).

Quadro 6 - Características técnicas da célula de carga modelo TBSPL

Capacidade máxima	25 kg
Dimensão máxima da plataforma	350 x 350 mm
Torque de aperto	10 Nm
Sensitividade	$2,0 \pm 0,2$ mV/V
Grau de proteção	IP 65
Resistência elétrica de entrada	410 ± 2 Ω
Resistência elétrica de saída	350 ± 3 Ω
Faixa de temperatura nominal	-20 até +60°C
Limite de carga de segurança	Até 150% da capacidade nominal
Tensão recomendada de excitação	10 VCC
Tensão máxima de excitação	15 VCC
Material	Alumínio

Fonte: Allegrini (2014).

4.2.4 Sensores de corrente

Durante os ensaios, através dos sensores de corrente da marca LEM modelo AT 100 B10 (Figura 10) foram coletadas as potências consumidas do motor do centro de usinagem. A captação do sinal dos sensores de corrente foi feita através de uma placa de aquisição de dados em que foram armazenados.

Figura 10 - Transdutor de corrente, marca LEM, modelo AT 100 B10



Fonte: Müzel (2017).

4.2.5 Sensores piezelétricos

Os valores de vibração foram medidos por um sensor piezelétrico (Figura 11) e por um amplificador de sinal com saída retificada em RMS (*Root Mean Square*), da marca *Vibro*

Control, modelo TV100 cujas características técnicas estão descritas no **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Figura 11 - Sensor piezelétrico da marca *Vibro Control*, modelo TV100



Fonte: Müzel (2017).

Quadro 7 - Características técnicas do sensor de vibração

Dimensões	Diâmetro: 35 mm Altura: 85 mm
Tensão de alimentação	24 VCC
Rosca para fixação do parafuso	5/16"
Corrente de saída	0 – 24 mA
Faixa de vibração	0 – 25 mm.s ⁻¹ (RMS)
Faixa de frequência	10 – 1000 Hz
Faixa de temperatura nominal	-5 até +70°C
Massa do sensor	300 g
Material do invólucro	Aço inox
Grau de proteção	IP 67

Fonte: Allegrini (2014).

4.2.6 Bloco de conectores e cabo de ligação

Para realizar a interface entre os sinais analógicos, recebidos dos sensores mencionados anteriormente, e digitais do centro de usinagem e encaminhá-los para uma placa de aquisição de dados foi utilizado um bloco de conectores (Figura 12) e um cabo de ligação placa/bloco de conectores da marca *National Instruments*, modelo SHC68-EPM (2m) 192061-02. As características técnicas do modelo do bloco de conectores NI BNC 2120 estão no Quadro 8.

Figura 12 - Bloco de conectores NI BNC 2120



Fonte: Allegrini (2014).

Quadro 8 - Características técnicas do bloco de conectores

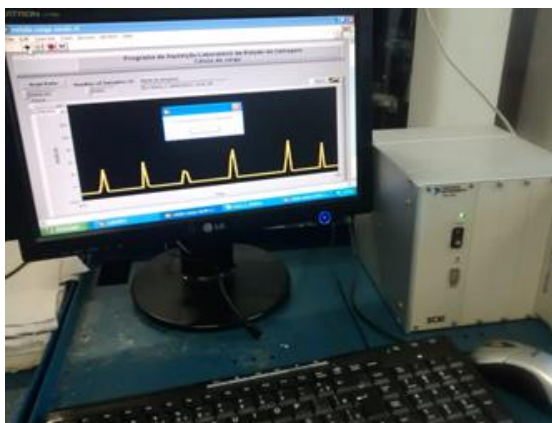
Dimensões	267 x 112 x 59,7 mm
Massa aproximada	1 kg
Conector de E/S	68 pinos tipo macho SCSI-II
Nº de conectores tipo BNC	15
Nº de plugs tipo “screw”	31
Temperatura de operação	0 – 50 °C

Fonte: Allegrini (2014).

4.2.7 Placa de aquisição de dados

Utilizou-se também uma placa de aquisição de dados, marca *National Instruments*, modelo NI PCI 6220 (Figura 13). A placa de aquisição de dados, conectada ao computador, recebe os sinais analógicos dos sensores e os transforma em sinais digitais para ser interpretado pelo *software*. O programa utilizado para captação dos dados adquiridos pelos sensores foi feito no *software LabView 7.1* da *National Instruments*, onde a taxa de captação de dados foi adequada para 4000 pontos por segundo.

Figura 13 - Computador e placa de aquisição de dados modelo NI PCI 6220

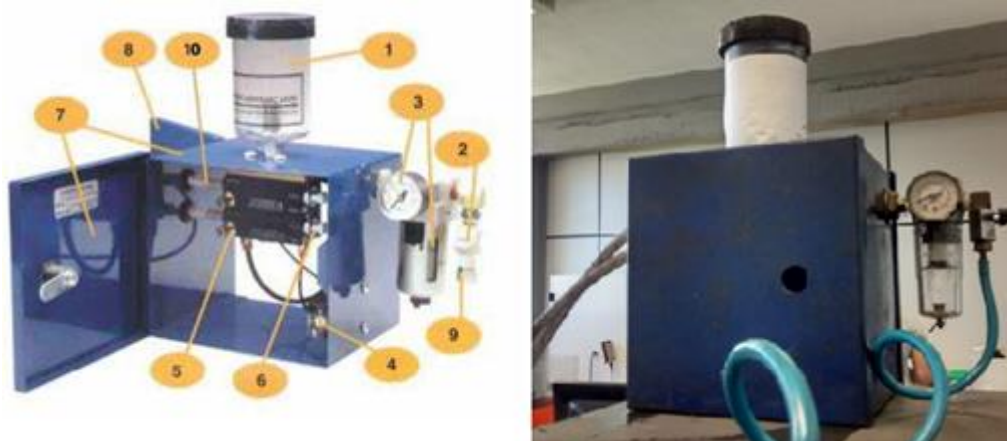


Fonte: Produção do próprio autor.

4.2.8 Aplicação de MQF

Dois modos de furação foram realizados nos ensaios, furação com MQF e furação a seco. Para a aplicação da MQF foi utilizado um dispositivo de MQF da marca ACCU LUB modelo ITW-79053D (Figura 14). As condições pré-definidas de operação deste dispositivo durante os ensaios foram de vazão 93 ml/h e pressão de 4 bar. O óleo utilizado foi o LB 1100, do fabricante ACCU LUB.

Figura 14 - Dispositivo para aplicação da MQF



Fonte: Adaptado de Allegrini (2014).

Sendo:

- 1) Reservatório de 300 ml;
- 2) Registro de acionamento;
- 3) Manômetro e filtro de ar;

- 4) Gerador de frequência;
- 5) Bomba pneumática de ajuste individual;
- 6) Ajuste do fluxo de lubrificante;
- 7) Caixa metálica;
- 8) Furos de montagem ou bases magnéticas para fixação rápida;
- 9) Entrada de ar;
- 10) Saída para o bocal aplicador.

4.2.9 Conjunto de pinos padrão

Após os ensaios de furação foram utilizados conjuntos de pino padrão, da marca VEB LANGENMESSTECHNIK - LIMBACH, 4-5/0,01 e 5-6/0,01, para a medição do diâmetro final dos furos (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

Figura 15 - Conjunto de pinos padrão da marca VEB LANGENMESSTECHNIK - LIMBACH, 4-5/0,01 e 5-6/0,01



Fonte: Produção do próprio autor.

4.2.10 Rugosímetro

Para a medição da qualidade do furo em relação à sua rugosidade utilizou-se um rugosímetro da marca *Mahr* e modelo *MarSurf M 300* (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). Para este parâmetro qualitativo foram medidas a rugosidade média (R_a) e a rugosidade total (R_t).

Figura 16 - Rugosímetro da marca *Mahr* e modelo *MarSurf M 300*



Fonte: Produção do próprio autor.

4.2.11 Ferramenta

Neste ensaio foram utilizadas 5 brocas de aço rápido, do fabricante IRWIN, com diâmetro de 5 mm, sem revestimento (Figura 17).

Figura 17 - Broca de aço rápido, marca IRWIN, 5 mm



Fonte: Produção do próprio autor.

4.3 METODOLOGIA

Para a realização da operação de furação foi feita a variação de alguns parâmetros importantes para o processo, sendo eles: a velocidade de corte, a velocidade de avanço e o modo de lubrificação. Para cada ensaio foi realizada a coleta de dados através dos equipamentos citados acima. Os dados considerados relevantes para o processo de furação foram a força axial necessária para a usinagem do furo, a potência consumida do motor do centro de usinagem e a vibração gerada por cada condição de corte. Ainda cada condição de corte foi realizada em duplicata para aumentar a confiabilidade dos dados coletados através dos equipamentos utilizados.

A variação de parâmetros de entrada foram as seguintes:

- Velocidade de corte: 60, 80 e 100 m/min;
- Avanço: 0,05, 0,10 e 0,15 mm/rotação;
- Lubrificação: a seco e com MQF.

Esta variação de parâmetros se deu de maneira a cobrir todas as possibilidades de condições de furação. Inicialmente foram feitos os furos a seco combinando as três velocidades de corte com as três velocidades de avanço. Para cada combinação foram feitos dois furos.

Quando terminados os furos a seco instalou-se o equipamento para aplicação da MQF a fim de levantar os dados a respeito da melhoria ou modificação da qualidade dos furos nesta condição. Da mesma maneira foram combinados os valores de velocidade de corte com a velocidade de avanço.

Durante a execução dos ensaios os diversos dados foram coletados e armazenados no computador conectado aos captadores e receptores de informações previamente instalados no centro de usinagem utilizado para a furação. Os dados adquiridos foram copiados e transferidos para programas desenvolvidos no *software MatLab*. Posteriormente, foram tratados e as informações necessárias foram extraídas para a análise dos resultados obtidos no processo.

Deste modo, foram obtidos os valores da força axial aplicada para cada furo, da potência consumida e da vibração dos 36 furos realizados. Todos os dados alimentaram outro *software*, o *MiniTab 17* e, através dele, foram feitas as análises estatísticas a fim de compreender como a variação de cada parâmetro de entrada, ou seja, a velocidade de corte, a velocidade de avanço e a condição de lubrificação, influenciou na condição final de execução do furo e, conseqüentemente, na sua qualidade.

Na análise estatística realizou-se uma análise de variância (ANOVA), com nível de significância de 5%. Com o resultado desta análise pode-se determinar se alguma das diferenças entre as médias é realmente significativa em termos estatísticos.

A comparação do valor-*p* com o nível de significância é o que permite avaliar a hipótese nula. Na hipótese nula afirma-se que as médias são todas iguais. Os 5% de significância mostram que o risco de se concluir que existe uma diferença quando na realidade não há diferença concreta é de 5%. Foi utilizado também o critério proposto por Phadke (1989), onde um $F > 2$ já deve ser levado em consideração, por significar que o valor obtido é no mínimo duas vezes maior que qualquer tipo de erro (Phadke, 1989 apud Müzel, 2017, p. 87).

Além desta análise estatística dos parâmetros de entrada, foram realizadas análises qualitativas dos furos produzidos e da rugosidade dos mesmos. Tais análises compreendem a

utilização de pinos padrão para a verificação do erro diametral em cada furo. E a análise de rugosidade dos furos, realizada através do rugosímetro onde foram coletados os dados de rugosidade média e total dos furos usinados em cada ensaio. Mesmo sendo uma análise qualitativa utilizou-se os valores obtidos das duas análises para, através do *MiniTab*, verificar a significância estatística desses resultados qualitativos.

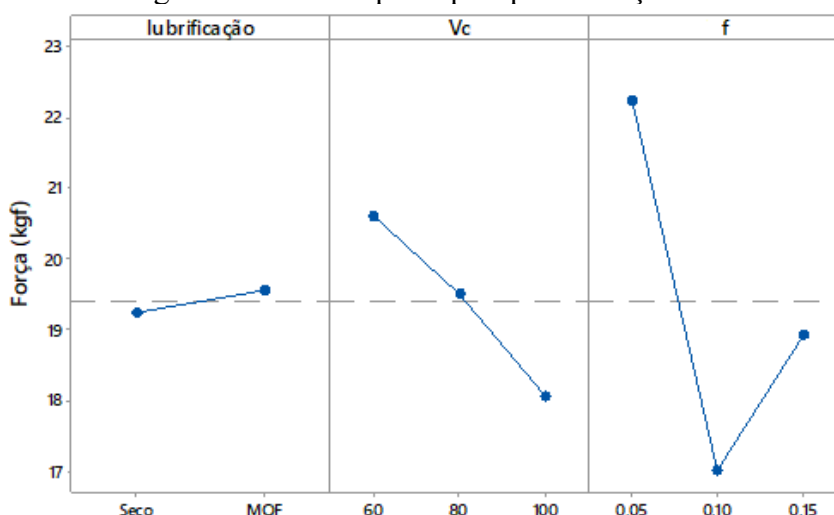
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na avaliação dos resultados obtidos nos parâmetros de saída foi considerado que quanto menor os valores, melhor foi a combinação dos parâmetros de entrada. Por exemplo, numa dada condição de velocidade de corte, de avanço e de lubrificação, se a força consumida no processo foi menor, significa que foi um resultado melhor ou positivo.

Uma ressalva deve ser feita, pois um resultado que se mostra significativo em termos estatísticos pode não ser significativo na prática, ou seja, a significância estatística não é um fator decisivo para dizer que os resultados sejam válidos na prática. Um exemplo é a utilização de um teste de alto poder em que se pode concluir que uma pequena diferença a partir do valor hipotético é estatisticamente significativa, porém essa pequena diferença pode ser sem sentido para uma situação em particular, dessa forma um julgamento e uma avaliação melhor devem ser feitos em cima dos resultados obtidos.

Na análise gráfica da influência dos parâmetros de corte para a força axial no processo de furação (Figura 18), verificou-se que com a modificação do modo de lubrificação o avanço de 0,10 mm/rotação foi o parâmetro que apresentou o menor valor para a força. Já a velocidade de corte mostrou uma tendência de que seu aumento leva a uma menor força necessária para a furação.

Figura 18 - Efeitos principais para a força axial



Fonte: Produção do próprio autor.

Na análise estatística dos parâmetros para a força, verifica-se que apesar de graficamente a velocidade de corte e o avanço tenham influenciado na redução da força aplicada durante a furação, apenas o avanço com o valor de F igual a 2,06 ($F > 2$) deve ser considerado, mesmo

que seu erro seja maior que o nível de significância de 0,05 (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

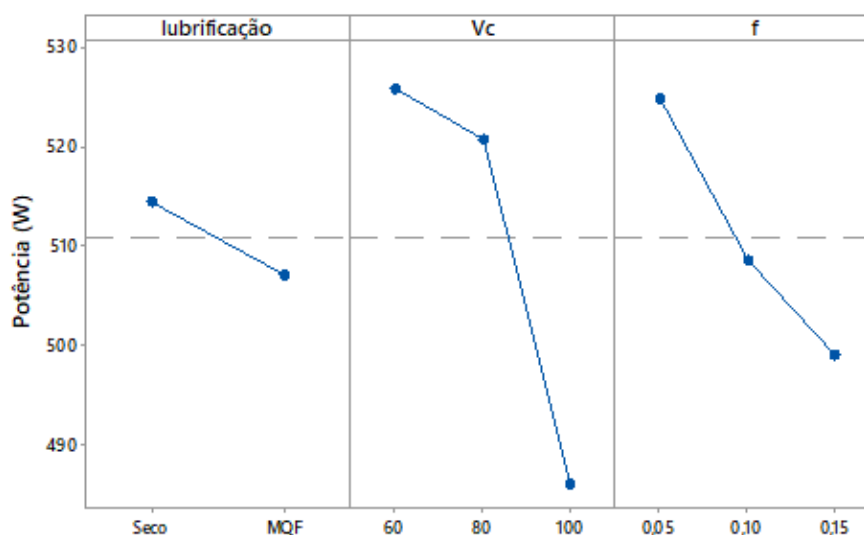
Tabela 3 - Análise de variância (ANOVA) dos efeitos principais para a força axial

Fonte	F	p
Linear		
Lubrificação	0,02	0,89
Vc	0,48	0,626
f	2,06	0,157
Interação dupla		
Lubrificação x Vc	0,39	0,681
Lubrificação x f	0,59	0,564
Vc x f	0,74	0,576
Interação tripla		
Lubrificação x Vc x f	0,73	0,779

Fonte: Produção do próprio autor.

Na análise de Figura 19, pode-se observar que entre a lubrificação a seco ou com a MQF não apresentam diferenças importantes. Já o aumento tanto da velocidade de corte, quanto do avanço levam a um menor consumo de potência durante a furação, sendo que a velocidade de corte de 100 m/min foi a que obteve o menor valor de potência empregado nos ensaios.

Figura 19 - Efeitos principais para Potência



Fonte: Produção do próprio autor.

Na análise estatística de variância dos parâmetros para a potência, representados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, verifica-se que entre os três parâmetros de entrada apenas a velocidade de corte teve efeito significativo, com valor de $F > 2$ e $p < 0,05$. Desta

forma, concatenando a análise gráfica e a análise estatística, a velocidade de corte, isoladamente, foi um fator diferencial para a força axial. O avanço com $F = 6,15$ ($F > 2$) mesmo com o erro $p = 0,009$ também deve ser considerado como significativo. Ainda pode-se notar que a interação entre os parâmetros não surtiu efeitos consideráveis.

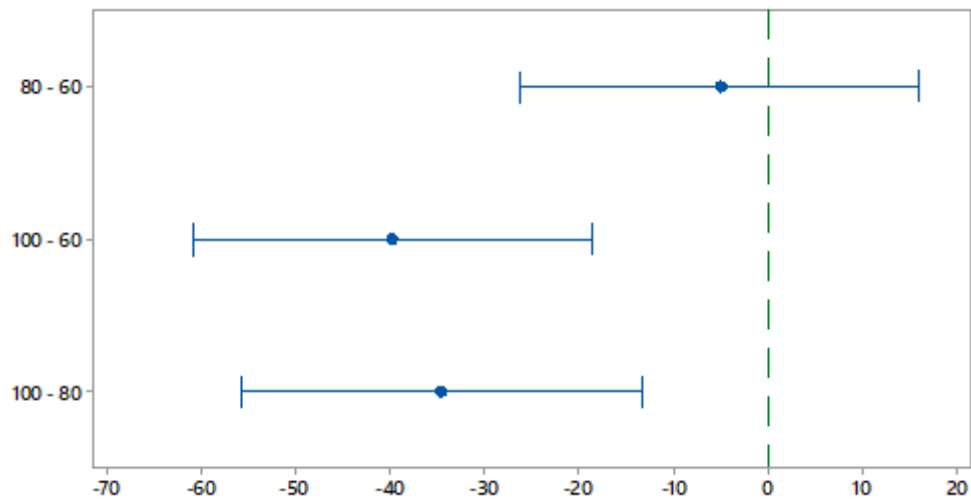
Tabela 4 - Análise de variância (ANOVA) dos efeitos principais para a potência

Fonte	F	p
Linear		
Lubrificação	1,48	0,240
Vc	<u>17,03</u>	<u>0,000</u>
f	<u>6,15</u>	<u>0,009</u>
Interação dupla		
Lubrificação x Vc	0,68	0,520
Lubrificação x f	0,97	0,398
Vc x f	1,95	0,146
Interação tripla		
Lubrificação x Vc x f	0,44	0,779

Fonte: Produção do próprio autor.

Ainda para a potência foi realizada uma análise pelo Método de *Tukey*, que permite verificar se os três valores de velocidade de corte estão ou não em grupos diferentes. Pela análise do Figura 20 verifica-se que a velocidade de corte de 100 m/min está em um grupo e as velocidades de 60 e 80 estão em outro grupo, o que indica que usar as velocidades de corte de 60 ou 80 m/min não causa diferença significativa nos resultados. Porém, a velocidade de corte de 100 m/min gera melhores resultados para a redução da potência empregada na furação.

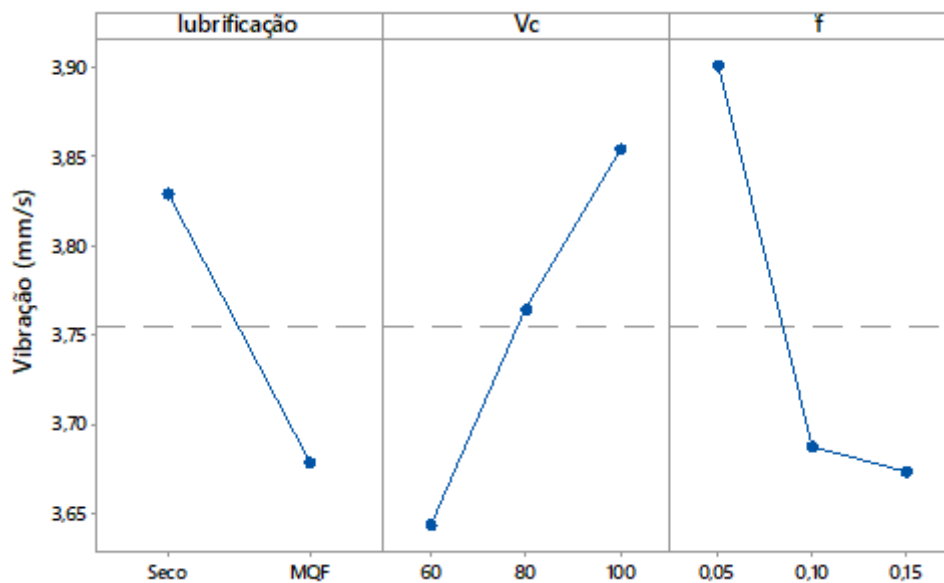
Figura 20 - Diferenças significativas para potência - *Tukey*



Fonte: Produção do próprio autor.

Analisando graficamente os efeitos dos parâmetros de corte para a vibração (Figura 21), nota-se que com a lubrificação com a MQF atingiu-se menores valores de vibração em relação à furação a seco. Observa-se ainda que para maiores valores de velocidade de corte, maiores são os níveis de vibração e o aumento do avanço é outro parâmetro que tende a diminuir a vibração no processo de furação.

Figura 21 - Efeitos principais para vibração



Fonte: Produção do próprio autor.

Pela análise estatística de variância para a vibração, nenhum dos parâmetros de entrada, como a velocidade de corte, a velocidade de avanço e a lubrificação tiveram um efeito significativo na redução da vibração durante o processo, vide dados na Tabela 5.

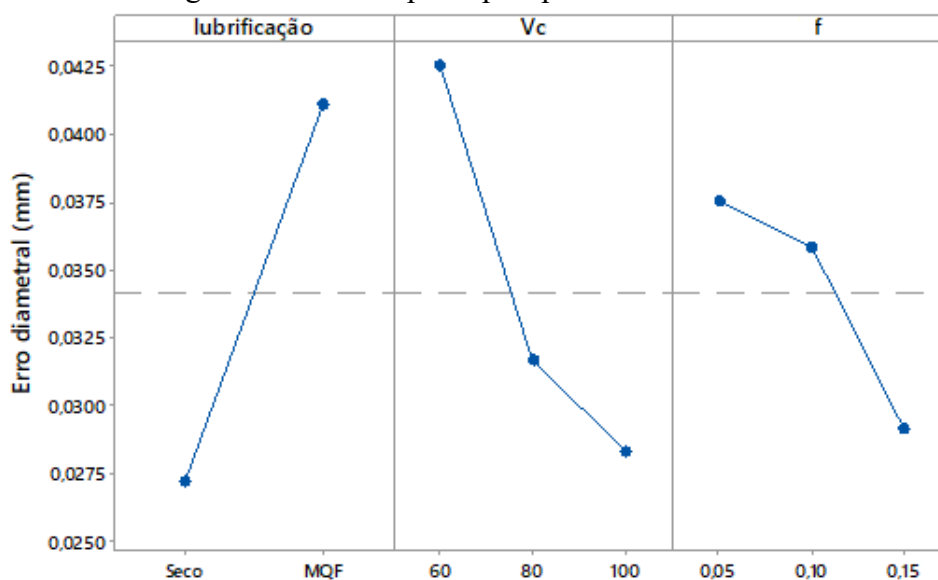
Tabela 5 - Análise de variância (ANOVA) dos efeitos principais para a vibração

Fonte	F	p
Linear		
Lubrificação	1,49	0,238
V_c	0,98	0,396
f	1,43	0,265
Interação dupla		
Lubrificação x V_c	0,31	0,735
Lubrificação x f	1,33	0,290
V_c x f	0,54	0,711
Interação tripla		
Lubrificação x V_c x f	0,34	0,844

Fonte: Produção do próprio autor.

Através do Figura 22 foi realizada a análise dos efeitos principais para o erro diametral em que identificou-se que o processo de furação com a aplicação da MQF resultou num erro diametral maior que na furação a seco. Analisando em termos da velocidade de corte, nota-se que o erro diametral diminuiu conforme o aumento da velocidade de corte. O mesmo ocorreu com o avanço, que teve melhores resultados nas velocidades maiores.

Figura 22 - Efeitos principais para o erro diametral



Fonte: Produção do próprio autor.

Na análise de variância dos parâmetros de entrada que foram significativos para o erro diametral, a lubrificação se destaca, pois na avaliação do valor F , que foi maior que 2, e do valor de p que foi menor que 0,05, destacados na Tabela 6, desta forma é uma variável significativa. Além da lubrificação a velocidade de corte com $F = 2,35$, a interação da velocidade de corte com o avanço com $F = 5,23$, e a interação tripla dos parâmetros com $F = 2,36$ também devem ser considerados como significativos.

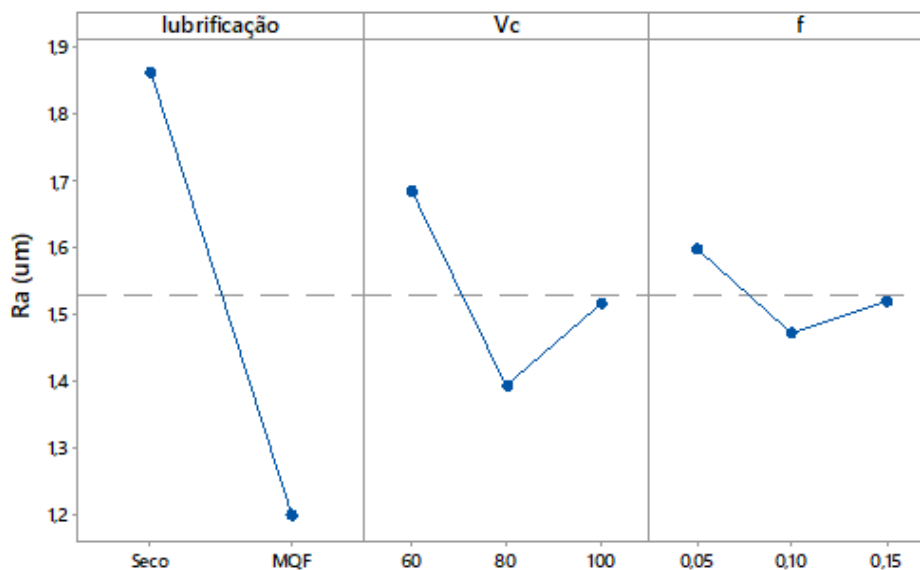
Desta forma com a análise cruzada da Figura 22 e da Tabela 6 conclui-se que a lubrificação com maior valor de F e erro menor que 0,05 foi significativa, já a velocidade de corte (isoladamente), a interação dupla $V_c \times f$ e a interação tripla lubrificação $\times V_c \times f$ também devem ser considerados significantes por possuírem $F > 2$.

Tabela 6 - Análise de variância (ANOVA) dos efeitos principais para o erro diametral

Fonte	F	p
Linear		
<u>Lubrificação</u>	<u>6,19</u>	<u>0,023</u>
<u>V_c</u>	<u>2,35</u>	<u>0,124</u>
f	0,83	0,451
Interação dupla		
Lubrificação $\times V_c$	0,31	0,739
Lubrificação $\times f$	0,75	0,485
<u>V_c $\times$ f</u>	<u>5,23</u>	<u>0,06</u>
Interação tripla		
<u>Lubrificação $\times V_c \times f$</u>	<u>2,36</u>	<u>0,92</u>

Fonte: Produção do próprio autor.

Por meio da Figura 23 pode-se analisar que a lubrificação com a aplicação de MQF foi o parâmetro mais significativo para a rugosidade média (R_a), pois ela apresentou valores menores que na furação a seco. A variação da velocidade de corte e de avanço não tiveram resultados expressivos para reduzir a rugosidade média do furo.

Figura 23 - Efeitos principais para rugosidade média (R_a)

Fonte: Produção do próprio autor.

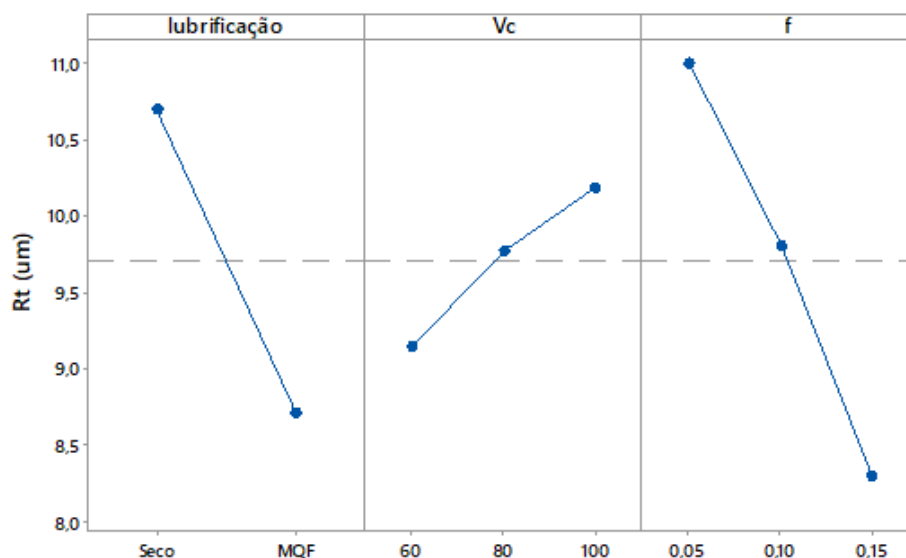
Analisando a variância para a rugosidade média, a lubrificação foi o parâmetro mais significativo com valor de F igual a 7,29 ($F > 2$) e valor de p igual a 0,015 ($p < 0,05$), conforme dados da Tabela 7. Isso confirmou que a lubrificação com a MQF é um fator significativo para produzir furos com rugosidades médias menores.

Tabela 7 - Análise de variância (ANOVA) dos efeitos principais para a rugosidade média

Fonte	F	p
Linear		
Lubrificação	7,29	0,015
V_c	0,47	0,630
f	0,09	0,915
Interação dupla		
Lubrificação x V_c	1,77	0,199
Lubrificação x f	2,71	0,093
V_c x f	1,78	0,177
Interação tripla		
Lubrificação x V_c x f	0,23	0,920

Fonte: Produção do próprio autor.

Analisando o Figura 24, observa-se que a rugosidade total teve os menores valores com o modo de lubrificação com a MQF e na condição com avanço de 0,15 mm/rotação. A velocidade de corte não teve um resultado expressivo para a rugosidade total.

Figura 24 - Efeitos principais para a rugosidade total (R_t)

Fonte: Produção do próprio autor.

A análise de variância para a rugosidade total mostra que nenhum dos parâmetros de entrada teve significância isoladamente, porém a interação da velocidade de corte com o avanço teve um resultado significativo na redução da rugosidade total do furo. Isso foi constatado através dos resultados do valor de F igual a 5,52 (maior que 2) e valor de p igual a 0,040 (menor que 0,05), conforme dados da Tabela 8.

Tabela 8 - Análise de variância (ANOVA) dos efeitos principais para rugosidade total

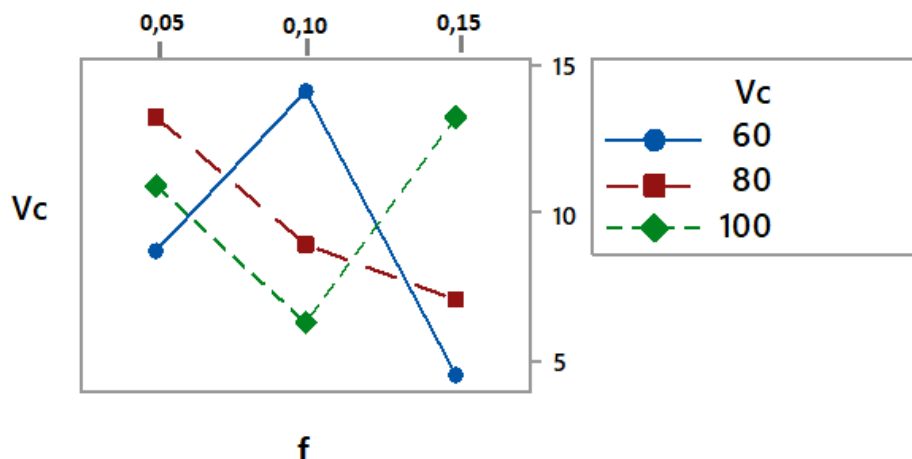
Fonte	F	p
Linear		
Lubrificação	2,43	0,137
V_c	0,23	0,800
f	1,50	0,250
Interação dupla		
Lubrificação x V_c	1,74	0,204
Lubrificação x f	2,95	0,078
V_c x f	5,52	0,040
Interação tripla		
Lubrificação x V_c x f	0,49	0,746

Fonte: Produção do próprio autor.

Como a análise de variância mostra que a interação das duas velocidades é significativa, é pertinente analisar os gráficos de interação dos parâmetros de entrada para a rugosidade total. Na análise gráfica de interação para a rugosidade total (R_t) verifica-se que a melhor combinação

de parâmetros foi a velocidade de corte de 60 m/min com avanço de 0,15 mm/rotação que resultou na rugosidade total abaixo de 5 (Figura 25).

Figura 25 - Interação dupla $V_c \times f$ para a rugosidade total (R_t)



Fonte: Produção do próprio autor.

Após a análise da influência de cada parâmetro de entrada em relação aos parâmetros de saída e de melhor acabamento, todos os dados coletados foram analisados para se chegar na melhor condição de corte. Através dos resultados compilados na Tabela 9, é possível perceber qual condição de ajuste das variáveis de entrada afetou da melhor maneira cada parâmetro de interesse.

Para avaliar a melhor condição alguns critérios foram adotados para os parâmetros de saída. O critério geral estabelecido foi: quanto menor o valor obtido para uma determinada variável, melhor foi a condição de corte, ou seja, quanto menor a vibração, potência, força, erro diametral e rugosidades melhor foi o resultado final do furo obtido. Já nos critérios específicos foram adotados os seguintes valores de referência de melhor condição, após a análise de todos os resultados:

- Potência: potências abaixo de 500 W;
- Força: forças abaixo de 20 kgf;
- Erro diametral: menor ou igual a 0,03 mm;
- Rugosidade média: menor ou igual a 1 μm ;
- Rugosidade total: menor ou igual a 7 μm .

Os melhores resultados obtidos durante este estudo foram compilados na Tabela 9.

Tabela 9 - Melhores condições para os parâmetros de interesse

Lubrificação	Vc (m/min)	f (mm/rot)	Potência (W)	Força (kgf)	Vibração (mm/s)	Erro diametral (mm)	R _a (μm)	R _t (μm)
MQF	80	0,10	470,696	15,282	3,663	0,03	0,409	2,960
MQF	80	0,15	527,711	24,728	3,678	0,02	0,429	3,156
MQF	100	0,10	473,689	8,788	3,631	0,01	0,608	4,144
MQF	100	0,15	472,869	17,823	3,616	0,01	0,811	7,996
Seco	100	0,10	494,498	20,368	3,800	0,01	0,874	5,744
Seco	100	0,15	458,518	13,689	3,694	0,02	1,579	11,800
MQF	100	0,15	454,213	12,775	3,709	0,01	2,499	16,100

Fonte: Produção do próprio autor.

Seguindo os critérios pré-estabelecidos, a condição de corte que resultou na menor potência aplicada foi com velocidade de corte de 100 m/min, avanço de 0,15 mm/rotação e com a MQF.

Para a força o melhor ajuste dos parâmetros foi com a velocidade de corte de 100 m/min, o avanço de 0,10 mm/rotação, com a MQF.

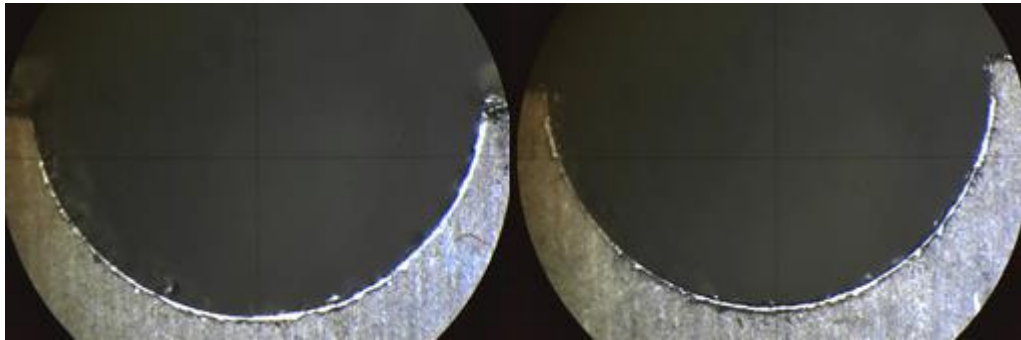
A vibração foi um parâmetro que não teve grande variação, tendo uma média entre os ensaios de 3,754 mm/s.

Na avaliação da melhor condição para o erro diametral muitos dos ensaios ficaram dentro do critério pré-estabelecido, porém no geral os menores valores de erro diametral ocorreram nos ensaios a seco.

Para a rugosidade média o melhor conjunto de variáveis de entrada foi com a velocidade de corte de 80 m/min, avanço de 0,10 mm/rotação e com a MQF. Isso resultou numa rugosidade média de 0,409 μm (Figura 26).

Esta mesma condição de corte foi responsável por gerar a menor rugosidade total com o valor de 2,960 μm.

Figura 26 - Melhor furo obtido



Fonte: Produção do próprio autor.

6 CONCLUSÃO

Para a avaliação da melhor condição de corte primeiramente é necessário saber quais parâmetros são os mais relevantes para a furação do alumínio 7075-T651 levando em conta sua aplicação. Dessa forma o melhor acabamento é o principal fator a ser considerado. O melhor acabamento se refere à menor rugosidade média e total. O erro diametral também é uma variável importante, porém é possível compensar o erro diametral alterando o diâmetro da broca utilizada na furação.

Dessa forma após avaliar todos os resultados obtidos, a condição ideal de corte para os valores de entrada pré-determinados, foi a velocidade de corte de 80 m/min, associada com o avanço de 0,10 mm/rotação e com a aplicação da MQF. E os resultados para os valores de saída foram: força igual a 15,282 kgf, potência igual a 470,696 W, vibração igual a 3,663 mm/s, rugosidade média de 0,409 μm , rugosidade total de 2,960 μm e erro diametral de 0,03 mm. Apesar do erro diametral ter sido mais alto que em outras condições ele está dentro da tolerância e pode ser compensado.

É interessante para trabalhos futuros testar a condição ideal encontrada, para comprovar a sua real eficácia, pois devido a limitação de tempo não foi possível testá-la. Todos os dados coletados e análises realizadas estão compilados em planilhas de *excel* podendo servir de banco de dados para estudos posteriores. Isso é importante uma vez que muitos desses dados são descartados.

REFERÊNCIAS

- ALCOA – Alluminium Company of America. **Catálogo de ligas e têmperas**. Disponível em https://www.alcoa.com/brasil/pt/resources/pdf/industria/catalogo_ligas_temperas_2010.pdf. Acesso em: 13 out. 2018.
- ALLEGRINI, A. **Aspectos da furação do titânio 6A14V com broca de aço rápido sinterizado e broca de metal duro**. 2014. 124f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017.
- 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. Rio de Janeiro: ABNT, 2013. 70p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6162**: conceito da técnica de usinagem, movimentos e relações geométricas – terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 1988. 37p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6158**: tabela de valores numéricos: grau de tolerância-padrão I. Rio de Janeiro: ABNT, 1995. 79p. Disponível em: <https://www.stefanelli.eng.br/grau-tolerancia-padrão-nbr-6158/>. Acesso em: 03 dez. 2018.
- BRAGA, D. U. **A técnica de mínima quantidade de fluido de corte aplicada no processo de furação de uma liga de alumínio-silício**. 2001. 204f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Campinas, Campinas, 2001.
- BORK, C. A. S. **Otimização de variáveis de processo para furação do aço inoxidável austenítico DIN 1.4541**. 1995. 146f. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Santa Catarina, 1995.
- CAVALCANTE, F. F. **Comportamento mecânico e tenacidade à fratura de ligas de alumínio 2024 e 7075 submetidas a diferentes tempos de envelhecimento**. 2016. 138f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.
- DINIZ, A. E. et al. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 8. ed. São Paulo: Art Liber, 2013. 272p.
- DIOGENES, A. C. **Estudo da usinagem por torneamento de ligas de alumínio**. 2011. 69f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.
- FERRARESI, D. **Fundamento da usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1977. 751p.
- FRANSSON, C. **Accelerated aging of aluminum alloys**. 2009. 83f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Karlstads Universitet, Karlstad, 2009.

GUERRERO, D. A. T.; MAROSTI, M. P.; SILVA, V. C. F. **Estudo sobre a preparação metalográfica da liga de alumínio AA7975-T6**. 2011. 48f. Trabalho de Conclusão de curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

INFOMET. **Ligas do sistema Al-Si**. Disponível em: <https://www.infomet.com.br/site/metais-e-ligas-conteudo-ler.php?codAssunto=52>. Acesso em: 23 nov. 2018.

MACHADO, A. R. et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. 2 ed. São Paulo: Blucher, 2011.

MÜZEL, S. D. **Estudo da usinagem dos compósitos plástico de madeira e madeira plástica**. 2017. 161f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017.

SANTOS, R.G. **Desenvolvimento de um método para comparar os limites de estabilidade dinâmica em máquinas-ferramentas utilizando o diagrama de lóbulos**. 2011. 137f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

SANTOS, S. C.; SALES, W. F. **Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais**. São Paulo: Artliber, 2007. 246 p.

SOUSA, J. A. G. **Desempenho de ferramentas reafiadas: furação**. 2011. 160f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

TSAO, C. C. Drilling process for composites. In: HOCHENG, H. **Machining technology for composite materials: principles and practice**. Amsterdam: Woodhead publishing limited, 2012. cap. 2, p. 17-64.

YOSHIKAWA, D. S. **Efeito de tratamentos de modificação da superfície na resistência à corrosão do alumínio 1050**. 2011. 138f. Dissertação (Mestrado em Ciências na área de Tecnologia Nuclear – Materiais) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN/CNEN-SP, 2011.

ZANGRANDI, A. **Alumínio e suas ligas: fundamentos metalúrgicos e tecnológicos**. Lorena: Instituto Santa Tereza, 2008.