

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA
CÂMPUS JARAGUÁ DO SUL – RAU
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM FABRICAÇÃO MECÂNICA

NATHAN BITENCOURT PEREIRA

ANÁLISE DA FORMAÇÃO DE REBARBA E RUGOSIDADE NA FURAÇÃO DA LIGA
DE ALUMÍNIO 6063 T5 COM BROCA HELICOIDAL DE AÇO RÁPIDO

JARAGUÁ DO SUL – SC, JUNHO DE 2018

NATHAN BITENCOURT PEREIRA

ANÁLISE DA FORMAÇÃO DE REBARBA E RUGOSIDADE NA FURAÇÃO DA LIGA
DE ALUMÍNIO 6063 T5 COM BROCA HELICOIDAL DE AÇO RÁPIDO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Superior de Tecnologia em Fabricação Mecânica, do Câmpus Jaraguá do Sul – Rau, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina para obtenção do título de Tecnólogo em Fabricação Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Gil Magno Portal Chagas.

JARAGUÁ DO SUL – SC, JUNHO DE 2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
por meio do programa de geração automática do câmpus Rau, do IFSC

Pereira, Nathan Bitencourt

**ANÁLISE DA FORMAÇÃO DE REBARBA E RUGOSIDADE NA FURAÇÃO
DA LIGA DE ALUMÍNIO 6063 T5 COM BROCA HELICOIDAL DE AÇO
RÁPIDO / Nathan Bitencourt Pereira ; orientação de
Gil Magno Portal Chagas. Jaraguá do Sul, SC, 2018.**

66 p.

**Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal
de Santa Catarina, Câmpus Jaraguá do Sul -
Rau. Tecnologia em Fabricação Mecânica. .
Inclui Referências.**

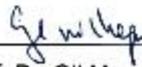
**1. Furação. 2. Alumínio. 3. Broca Helicoidal. 4.
Rebarba. 5. Rugosidade. I. Chagas, Gil Magno Portal .
II. Instituto Federal de Santa Catarina. . III. Título.**

NATHAN BITENCOURT PEREIRA

ANÁLISE DA FORMAÇÃO DE REBARBA E RUGOSIDADE NA FURAÇÃO DA LIGA
DE ALUMÍNIO 6063 T5 COM BROCA HELICOIDAL DE AÇO RÁPIDO

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título em Tecnólogo em
Fabricação Mecânica, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de
Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo
indicada.

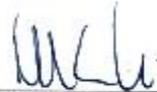
Jaraguá do Sul, 18 de junho de 2018



Prof. Dr. Gil Magno Portal Chagas

Orientador

IFSC – Campus Jaraguá do Sul - RAU



Prof. Me. Delcio Luis Demarchi

IFSC – Campus Jaraguá do Sul - RAU



Prof. Me. Gabriel Costa Sousa

IFSC – Campus Florianópolis

Dedico este trabalho à minha esposa,
família, amigos e a todos que
de algum modo auxiliaram
no desenvolvimento
deste estudo.

AGRADECIMENTOS

A minha esposa, pelo apoio, incentivo e compreensão durante a elaboração deste trabalho.

A minha família e amigos pelo apoio e incentivo oferecido.

Ao professor orientador Gil Magno Portal Chagas, pelo incentivo, confiança, e compartilhamento dos seus conhecimentos.

A todos os professores e técnicos de laboratório do IFSC – Câmpus Jaraguá do Sul – Rau, que de alguma maneira me auxiliaram durante a realização do estudo.

Ao Instituto Federal de Santa Catarina – Câmpus Jaraguá do Sul – Rau pelos conhecimentos adquiridos durante esses anos de curso.

Obrigado!

RESUMO

O processo de furação é muito utilizado, porém, quando parâmetros inadequados são usados a formação de rebarbas é evidente, principalmente em materiais dúcteis como algumas ligas de alumínio. A remoção das rebarbas é um processo posterior, em muitos casos difícil de realizar, sem contar no custo adicional. A rugosidade também é afetada quando não utilizados os parâmetros corretos, sendo que alguns formatos de cavacos, além de afetar a qualidade superficial dos furos, também geram esforços desnecessários, tanto da máquina quanto da ferramenta. Isso ocorre principalmente na furação de materiais dúcteis, onde a formação de cavacos possui grande volume. A partir destas dificuldades, um estudo foi realizado utilizando a liga de alumínio 6063 T5. Além da variação do avanço e velocidade de corte, brocas helicoidais do tipo N e W foram utilizadas. Analisando os resultados, notou-se que com a utilização da broca tipo W obteve-se as menores rebarbas, pois se trata de uma ferramenta indicada para o material estudado. Em relação a rugosidade, o fator que teve maior influência foi a velocidade de corte, onde o valor máximo utilizado apresentou os melhores resultados.

Palavras-chave: Furação. Alumínio. Broca Helicoidal. Rebarba. Rugosidade.

ABSTRACT

The drilling process is widely used, however when inadequate parameters are used the formation of burrs is evident, especially in ductile materials such as some aluminum alloys. Removal of burrs is a later process, in many cases difficult to perform, and does not add value to the product. Roughness is also affected when the correct parameters are not used, and some chip formats, besides affecting the surface quality of the holes, generate unnecessary machine and tool stress, especially in the drilling of ductile materials, where the formation of chips has a large volume. Considering these difficulties, a study was carried out using 6063 T5 aluminum alloy. In addition to the variation of the feed rate and cutting speed, type N and W helical drills were used. Analyzing the results, it was noticed that with the use of the type W drill the smaller burrs were obtained, because it is the indicated tool for the material studied. In relation to the roughness, the factor that had the greatest influence was the cutting speed, where the maximum value used showed the best results.

Keywords: Drilling. Aluminum. Helical Drill. Burr. Roughness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Direção dos Movimentos de Corte, Avanço e Efetivo na Furação	17
Figura 2 – Principais Tipos de Furação.....	18
Figura 3 – Geometria das Brocas Helicoidais	19
Figura 4 – Tipos de Brocas Helicoidais Conforme Ângulo de Hélice	20
Figura 5 – Afições para Brocas Helicoidais.....	21
Figura 6 – Pontos de Medição de uma Rebarba.....	23
Figura 7 – Formação das Rebarbas de Poisson (A) e Entrada (B)	24
Figura 8 – Formação da Rebarba de Rolagem	24
Figura 9 – Formação de Rebarba de Saída	25
Figura 10 – Relação Entre a Altura da Rebarba de Saída, Velocidade de Corte e Avanço: (A) Al 7010, (B) Al 2024.....	26
Figura 11 – Fatores que Contribuem para a Formação de Rebarba na Furação.....	28
Figura 12 – Rebarbas de Furação Segundo Kim; Min; Dornfeld.....	29
Figura 13 – Rebarbas de Furação Segundo Shikata	30
Figura 14 – Esquema da Cunha de Corte na Formação do Cavaco.....	31
Figura 15 – Classificação dos Cavacos Quanto à Forma Conforme ISO 3685.....	34
Figura 16 – Cavacos de Furação	35
Figura 17 – Parâmetros de Rugosidade Ra (A) e Rz (B)	37
Figura 18 – Broca Tipo N	40
Figura 19 – Broca Tipo W.....	40
Figura 20 – Estereoscópio.....	41
Figura 21 – Corpo de Prova	41
Figura 22 – Fixação do Corpo de Prova.....	44
Figura 23 – Método de Medição da Altura da Rebarba.....	45
Figura 24 – Avaliação da Rugosidade.....	46
Figura 25 – Pontos de Medição da Rugosidade.....	46
Figura 26 – Tipos de Rebarbas	47
Figura 27 – Amostra 18 – Dois Tipos de Rebarbas Encontradas.....	48
Figura 28 – Amostra 9 – Um Tipo de Rebarba Encontrada	48
Figura 29 – Medição das Rebarbas Tipo Tampa de Broca	51
Figura 30 – Efeito dos Fatores na Formação de Rebarbas.....	52

Figura 31 – Altura da Rebarba – Tipo de Broca x Avanço (mm/rot) x Velocidade de Corte (m/min)	53
Figura 32 – Efeito dos Fatores na Rugosidade	55
Figura 33 – Ra Média – Tipo de Broca x Avanço (mm/rot) x Velocidade de Corte (m/min)	56
Figura 34 – Cavacos Encontrados em Cada Amostra (escala em centímetros)	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ensaio de Resistência Mecânica do Alumínio 6063 T5.....	38
Tabela 2 – Composição Química do Alumínio 6063 T5	39
Tabela 3 – Variáveis do Processo.....	42
Tabela 4 – Parâmetros de Corte	43
Tabela 5 – Tipos de Rebarbas Encontradas	49
Tabela 6 – Altura Média das Rebarbas.....	50
Tabela 7 – Análise das Alturas das Rebarbas - ANOVA.....	51
Tabela 8 – Valor Médio da Rugosidade	54
Tabela 9 – Análise da Rugosidade – ANOVA	55
Tabela 10 – Tipos de Cavacos Encontrados.....	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

μm – Micrometro

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

Al – Alumínio

APC – Aresta postiça de corte

CNC – Comando numérico computadorizado

Cr – Cromo

Cu – Cobre

cv – Cavalo-vapor

DIN – Deutsche Industrie Normen (Associação de Normas Industriais Alemãs)

f – Avanço

Fe – Ferro

ISO – International Organization for Standardization

JIS – Japanese Industrial Standards (Associação de Normas Industriais Japonesas)

kW – Quilowatt

m/min – Metros por minuto

Mg – Magnésio

mm – milímetros

mm/rot – Milímetros por rotação

Mn – Manganês

MPa – Mega Pascal

N/mm² – Newton por milímetro quadrado

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

PVC – Policloreto de polivinila

Rm – Resistência a tração

rpm – Rotação por minuto

Si – Silício

Ti – Titânio

vc – Velocidade de corte

Zn – Zinco

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	16
1.1.1	Objetivo Geral	16
1.1.2	Objetivos Específicos	16
2	REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1	Processo de Furação	17
2.2	Tipos de Brocas Helicoidais	18
2.3	Furação em Alumínio	21
2.4	Rebarba	22
2.4.1	Rebarba no Processo de Furação	24
2.4.2	Fatores que Influenciam na Formação de Rebarba	25
2.4.3	Tipos de Rebarbas	28
2.5	Formação do Cavaco	30
2.5.1	Cavaco no Processo de Furação	32
2.5.2	Classificação dos Cavacos	33
2.6	Rugosidade	35
3	MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1	Materiais	38
3.2	Ferramentas de Corte	39
3.3	Equipamentos	40
3.4	Corpo de Prova	41
3.5	Parâmetros de Corte	42
3.6	Métodos	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
4.1	Classificação das Rebarbas	47
4.2	Altura das Rebarbas	50
4.3	Rugosidade	53
4.4	Classificação dos Cavacos	57
5	CONCLUSÃO	60
	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	61
	REFERÊNCIAS	62
	ANEXOS	66

1 INTRODUÇÃO

A furação é um dos processos de usinagem mais utilizados na indústria, e utiliza ferramentas com arestas cortantes definidas como, por exemplo, a broca helicoidal. (CASTILLO, 2005).

Com a grande competitividade do mercado atual, a busca por menores custos e maior qualidade das peças é constante, com isso, diferentes estudos têm buscado soluções para atender estes requisitos de fabricação (MIN; DORNFELD; NAKAO, 2003; ABDELHAFEEZ, 2015; GONÇALVES; SILVA; COSTA, 2017). Segundo Santos e Silva (2001), o processo de furação teve uma evolução diferente, quando comparada a processos como o fresamento e torneamento. Enquanto estes ganhavam destaques na utilização de novos materiais para a ferramenta de corte, buscando diminuir o tempo de fabricação, a furação se destacava pela geometria das brocas. Assim, mesmo permitindo obter furos mais precisos e maiores, o tempo de corte e produtividade do processo não teve grandes ganhos. Por outro lado, essas novas ferramentas melhoraram o acabamento superficial dos furos.

Um dos problemas da usinagem é a geração de rebarbas, que são materiais indesejáveis fixos nas bordas da peça, provenientes dos processos de fabricação. A presença de rebarbas gera grandes impactos econômicos, isso porque um processo posterior deve ser realizado, a rebarbação, que não agrega valor a peça. Os processos de furação e rebarbação são realizados nas etapas finais da produção, por isso, um erro nestas etapas, pode gerar um grande refugo (KILICKAP, 2010).

Em muitos casos, o aumento da formação de rebarbas gera um maior desgaste das ferramentas. O tamanho das rebarbas também é importante, pois quanto maior a rebarba, maior será o custo para removê-la. (AURICH et al., 2009; KIM; MIN; DORNFELD, 2001). Esse desgaste da ferramenta pode ocasionar um acabamento superficial indesejado.

A rugosidade é causada por imperfeições encontradas em uma superfície. Sofre influência de outros parâmetros além do desgaste da ferramenta, como a geometria da ferramenta e peça, rigidez do equipamento, condições de corte e material da peça e ferramenta. Sua importância aumenta conforme a precisão e ajustes entre as peças cresce (MARTINS, 2008).

De acordo com Lekkala et al. (2011 apud FERREIRA et al., 2015) as rebarbas, quando não removidas, podem gerar problemas ao romper-se durante o

funcionamento ou montagem da peça. O desprendimento de uma rebarba dentro de um equipamento em funcionamento pode causar graves danos e comprometer o seu funcionamento. Além de gerar risco físico ao operador/montador, durante a usinagem/montagem, devido as arestas que se formam serem cortantes.

Não existe um método específico para remoção das rebarbas. Cada processo tem suas características de formação, e assim de remoção. Portanto, ao realizar a rebarbação, é necessário se adaptar à realidade do processo ao qual se está envolvido. O processo de remoção da rebarba é muitas vezes difícil e nem sempre possível de ser realizado, devido a isto, o ideal é diminuir sua formação, e se possível, evitá-la. Um dos métodos mais eficazes para minimizar a formação de rebarbas é a alteração de parâmetros de usinagem, a fim de diminuir essas imperfeições (KO; CHANG; YANG, 2003).

Uma das principais razões para a redução da rebarba durante a usinagem é a diminuição do custo da rebarbação. Os principais fatores que favorecem a formação das rebarbas são as propriedades plásticas do material usinado e os parâmetros de velocidade de corte e avanço do processo. A deformação plástica de materiais dúcteis, como o alumínio, é outro fator que afeta diretamente a formação de rebarbas (AURICH et al., 2009; KIM; MIN; DORNEFELD, 2001).

Quando o processo de furação é aplicado em ligas de alumínio, a formação de rebarbas é praticamente inevitável, por isso, para conseguirmos diminuí-la, uma correta escolha dos parâmetros de corte e ferramentas a serem aplicadas é de fundamental importância.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar diferentes parâmetros para a furação da liga de alumínio 6063 T5 utilizando dois tipos diferentes de broca helicoidal de aço rápido, a fim de obter uma menor rebarba e melhor acabamento superficial ao final do processo.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar o tamanho da rebarba gerada;
- Avaliar a rugosidade dos furos;
- Identificar o tipo de rebarba gerada;
- Identificar o tipo de cavaco formado;
- Correlacionar a melhor condição de rebarba, parâmetros de corte e tipo de broca;
- Correlacionar a melhor condição de rugosidade, parâmetros de corte e tipo de broca.

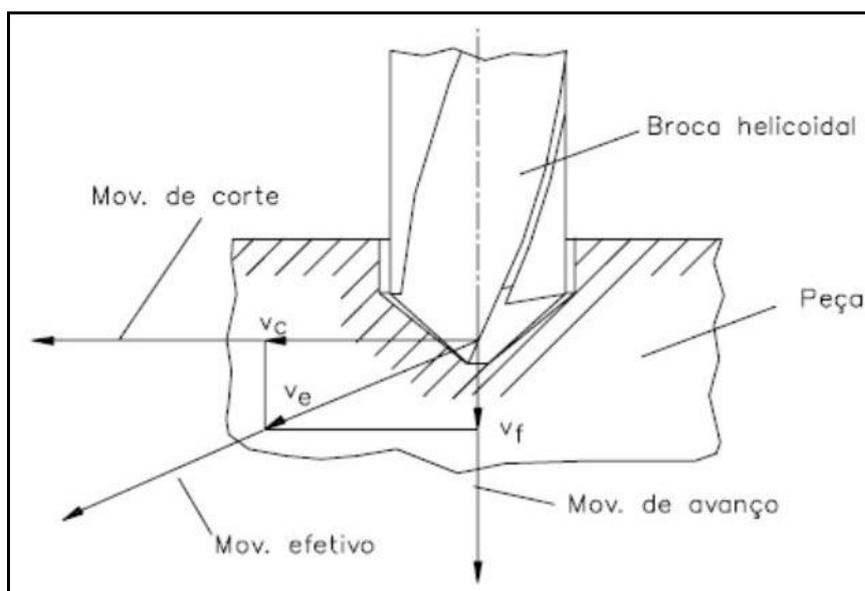
2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Processo de Furação

Na indústria da manufatura, o processo de furação é um dos mais utilizados, onde a maior parte das peças fabricadas necessitam ao menos de um furo durante sua fabricação (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Para obtenção dos furos a peça ou a ferramenta de corte giram e simultaneamente uma delas se desloca em direção a outra, gerando o furo através da retirada de material. Os principais movimentos do processo são os de avanço e de corte. O movimento de avanço é aquele entre a peça e a ferramenta que origina um levantamento repetido ou contínuo de material, durante as revoluções da ferramenta. O movimento de corte sem o movimento de avanço gera somente a retirada de material em uma única revolução (FERRARESI, 1970). A figura 1 mostra os principais movimentos no processo de furação.

Figura 1 – Direção dos Movimentos de Corte, Avanço e Efetivo na Furação



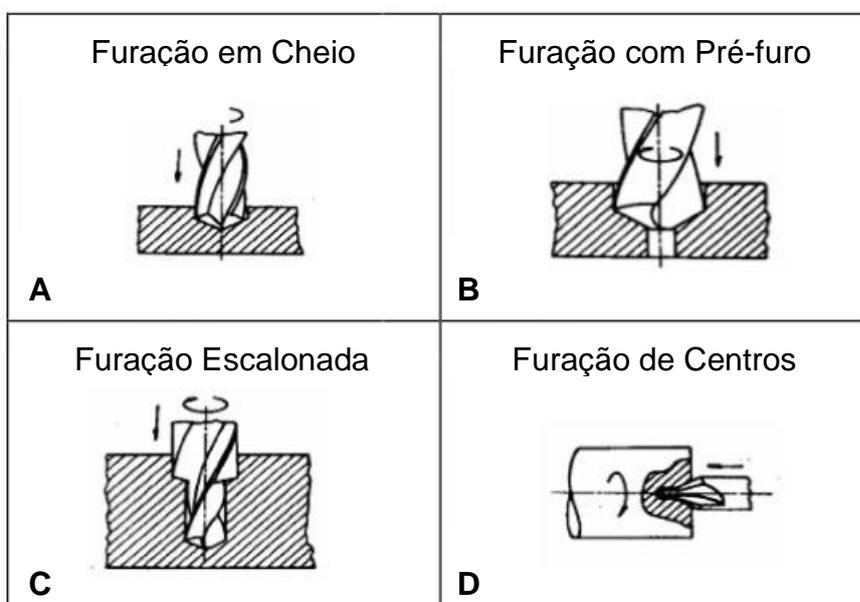
Fonte: Machado et al. (2011, p. 29)

Existem vários tipos de furação como, por exemplo, as furações em cheio, com pré-furo, escalonada e de centros (FERRARESI, 1970).

- Furação em cheio consiste na remoção total do material em apenas uma operação (figura 2 (A));

- Furação com pré-furo é aquela que se faz necessário a abertura de um furo com diâmetro inferior antes de obter o dimensionamento desejado, com o intuito de diminuir os esforços de corte e melhora no posicionamento do furo e a variação do dimensional (figura 2 (B));
- Furação escalonada tem o mesmo princípio da furação com pré-furo, porém utiliza apenas uma ferramenta para obtenção dos dois diâmetros (figura 2 (C));
- Furação de centros são utilizados para centrar as peças, tanto na abertura de furos com maior precisão de posicionamento quanto em operações posteriores, como o torneamento (figura 2 (D)).

Figura 2 – Principais Tipos de Furação



Fonte: Adaptado de Ferraresi (1970, p. XXX)

As ferramentas mais utilizadas no processo de furação são as brocas, sendo fabricadas em diversas geometrias como por exemplo chatas, helicoidais, canhão entre outras (STEMMER, 2005).

2.2 Tipos de Brocas Helicoidais

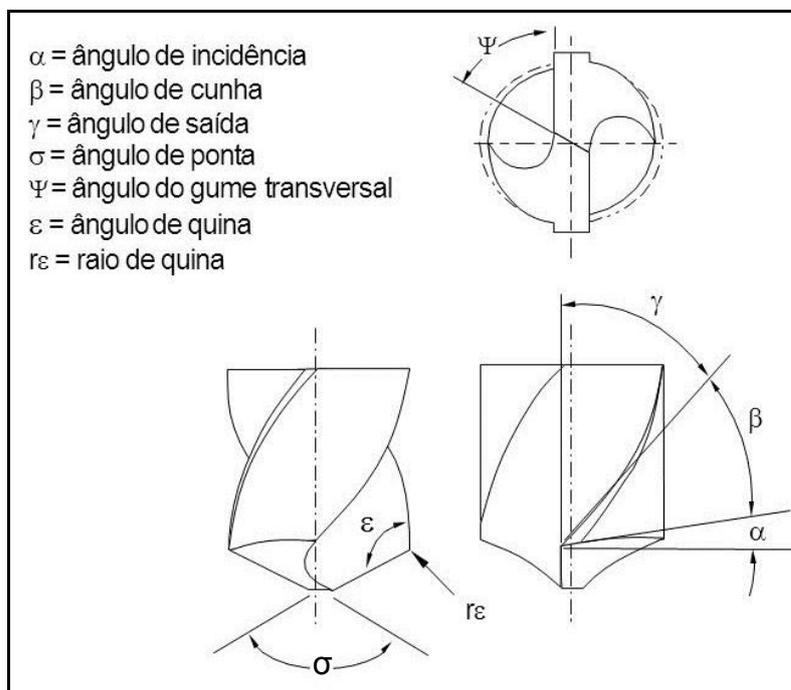
Segundo Mello (2011) as brocas helicoidais são as ferramentas mais utilizadas para realizar a abertura de furos, sendo fabricadas principalmente em aço

rápido. Mas existem outros materiais utilizados em sua fabricação como metal duro, além das brocas com revestimento.

O aço-rápido foi um dos primeiros materiais a ser utilizado na fabricação de ferramentas, e até nos dias de hoje é utilizado (SANTOS; SALES, 2007). Apresenta as principais características que os materiais de ferramentas precisam ter, como tenacidade, elevada resistência ao desgaste (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Castillo (2005) afirma que as brocas helicoidais são projetadas para furação em cheio e com pré-furos, e são classificadas de acordo com algumas características como o tipo do material, forma da haste, número de canais, sentido de corte, diâmetro, afiação da ponta. Além destas características construtivas, também são fabricadas de acordo com a geometria cortante. A figura 3 mostra os principais ângulos das brocas helicoidais.

Figura 3 – Geometria das Brocas Helicoidais

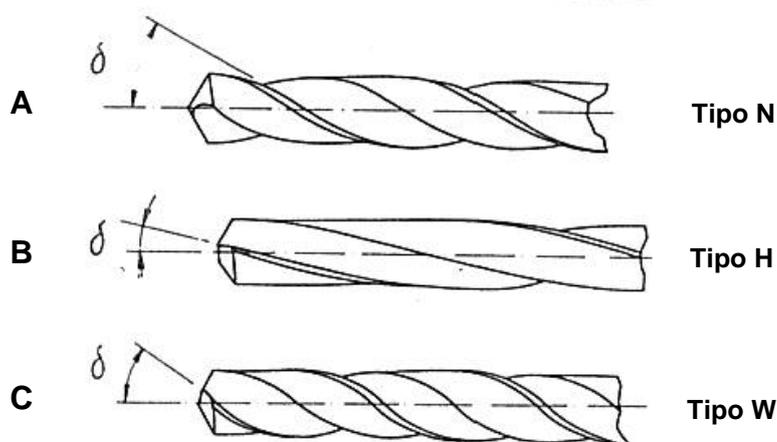


Fonte: Castillo (2005)

As brocas helicoidais são divididas em três classes, tendo como principais características construtivas os ângulos de hélice e ponta, sendo elas o tipo N, tipo H e tipo W (FISCHER et al., 2008; WEINGAERTNER; SCHOROETER, 1990).

- Tipo N: são as mais encontradas no mercado, com ângulo de hélice de 18° a 30° e ângulo de ponta de 118° (figura 4 (A)). Esta classe possui baixo custo e são recomendados para materiais com R_m de até 1000N/mm^2 como aços estruturais, aços para cementação;
- Tipo H: possui ângulo de hélice entre 10° a 15° e ângulo de ponta de 118° (figura 4 (B)). Indicado para materiais não ferrosos; frágeis com formação de cavaco curto, como ligas de CuZn;
- Tipo W: apresenta ângulo de hélice de 35° a 45° e ângulo de ponta de 130° (figura 4 (C)). Fabricadas para materiais macios e que produzem cavaco longo, exemplos são as ligas de alumínio, magnésio, aços inoxidáveis, além de materiais plásticos como poliamida e PVC.

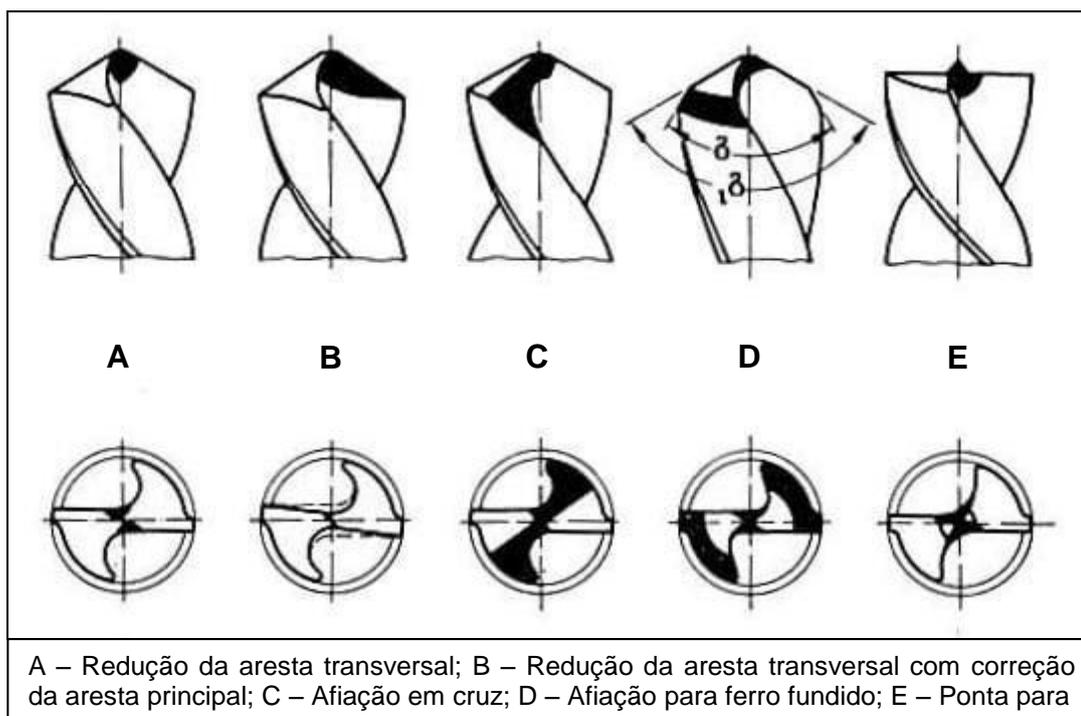
Figura 4 – Tipos de Brocas Helicoidais Conforme Ângulo de Hélice



Fonte: Weingaertner; Schoroeter (1990, p. 64)

Além dos formatos de brocas diferentes, existem alguns tipos de afiações especiais da ponta da ferramenta (figura 5), como a redução da aresta transversal (figura 5 (A)), que consiste em diminuir o gume para se obter uma redução na força de avanço. Afição em cruz (figura 5 (C)), onde se retifica um plano inclinado nas superfícies de incidência, reduzindo ou eliminando o gume transversal, criando efeito centrante. A afiação com ponta para centrar (figura 5 (E)) varia o ângulo de ponta de 150° a 180° , gerando pouca rebarba na saída, melhora o efeito centrante, reduz o tempo de usinagem, porém só deve ser empregado em chapas finas (STEMMER, 2005; SKF®, 1989).

Figura 5 – Afições para Brocas Helicoidais



Fonte: Adaptado de SKF® (1989, p. 8)

2.3 Furação em Alumínio

As ligas de alumínio são muito utilizadas em diversos setores da indústria, como na construção de aeronaves, veículos aeroespaciais e indústrias automotivas. Um dos principais fatores que o tornam de grande importância é sua baixa densidade (KILICKAP, 2010; NIKNAM, 2013). Em sua maioria, é um material de boa usinabilidade e a energia consumida por unidade de volume de material removido é baixo, gerando assim, em sua maioria, pouco desgaste da ferramenta durante os processos de usinagem quando trabalhados com parâmetros adequados (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

O processo de furação das ligas de alumínio gera um grande volume de cavaco, onde tende a encontrar dificuldades na saída devido principalmente a forma da ferramenta e a velocidade de corte baixa, gerando alguns tipos de desgaste e podendo ocasionar até a quebra da ferramenta (WEINGAERTNER; SCHOROETER, 1990).

Para Weingaertner e Schoroeter (1990), na furação dos aluminios pode-se utilizar ferramentas (brocas do tipo N) e equipamentos empregados na usinagem

dos aços em geral. Porém, para obtermos um melhor resultado é necessário a utilização de ferramentas designadas as ligas de alumínio, como as brocas do tipo W, mas pode-se também melhorar estes resultados elevando a velocidade de corte e o avanço do processo.

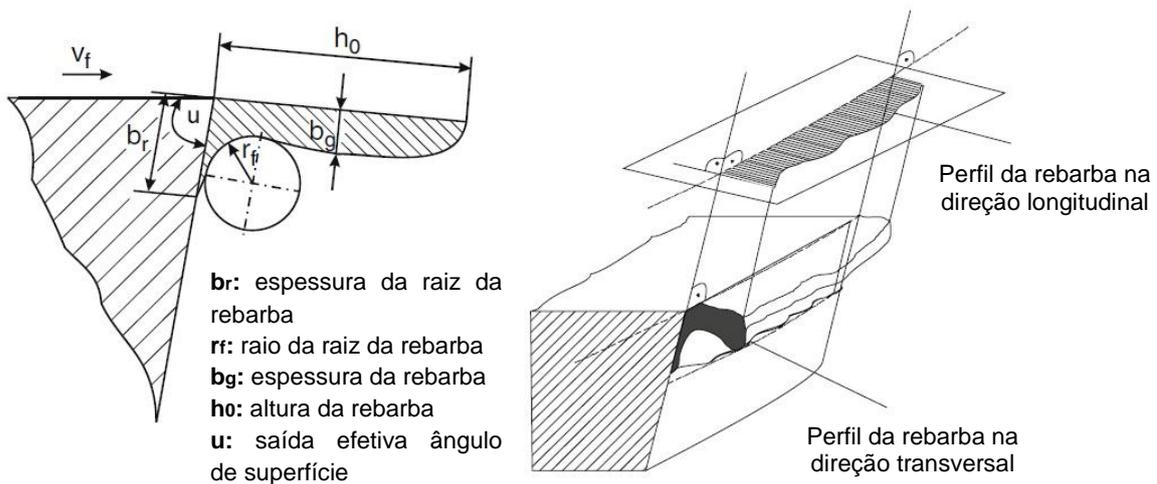
2.4 Rebarba

Rebarba é a parte de uma peça de trabalho que é produzido através de processos de fabricação em uma borda ou uma superfície e que fica fora da geometria desejada. Na maioria dos casos, as rebarbas são definidas como indesejadas projeções do material formada como resultado do fluxo plástico das operações de corte (AURICH et al., 2009).

As rebarbas além de indesejáveis, acabam gerando um processo posterior a usinagem para sua remoção, a rebarbação. Um Processo necessário para a obtenção da peça conforme projeto, aumentando o custo, porém sem agregar valor ao produto (AURICH et al., 2009).

Segundo Aurich et al. (2009) não existe classificações universais que definem as rebarbas, além de não existir uma padronização de medição e dimensões. Dessa forma, diferentes técnicas foram desenvolvidas para medição das rebarbas. Franke; Leitz e Aurich (2009) apresentaram um estudo sobre aplicações de diferentes métodos para detecção e medição de rebarbas atualmente, como sistemas ópticos, sistemas de táteis, medições destrutivas, entre outros. A figura 6 indica os principais pontos a se considerar na medição das rebarbas.

Figura 6 – Pontos de Medição de uma Rebarba



Fonte: Adaptado de Franke; Leitz e Aurich (2009)

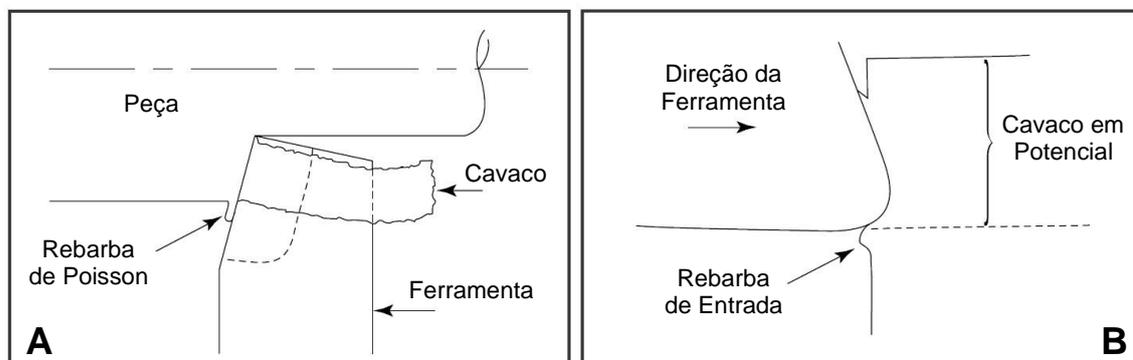
Para reduzir o custo do processo de rebarbação é necessário diminuir as rebarbas e, quando possível, eliminá-las. Para isso, é necessário entender o método e características de formação, levando em conta que cada processo de usinagem possui suas características específicas.

Alguns mecanismos durante a formação de rebarbas devem ser observados, como o fluxo, flexão e redeposição dos materiais, que são resultantes da deformação plástica e solidificação do material nas bordas de trabalho. Esses mecanismos acabam gerando diferentes formas de rebarbas, como as de Poisson, entrada e dobramento (GILLESPIE, 1999).

- A rebarba de Poisson ilustrada na figura 7 (A) é um tipo de rebarba que ocorre quando a aresta de corte se estende além da área de corte. Ocorre devido a deformação lateral de um sólido comprimido. A extensão desta deformação se dá em função do material e a peça, o tamanho e a forma de contato, além da carga aplicada. O tamanho da rebarba é proporcional ao raio da aresta da ferramenta e a força de corte.
- Rebarba de entrada é obtida quando a ferramenta entra em contato com a peça, e o material flui na direção oposta (figura 7 (B)). Esta formação depende das propriedades da peça e da forma da aresta de corte.
- Rebarbas de Rolagem ocorre na saída da ferramenta (figura 8 (A)), onde uma dobra da rebarba acontece (figura 8 (B)). Isso ocorre quando o dobramento é mais fácil que o cisalhamento. O comprimento desse tipo de rebarba é

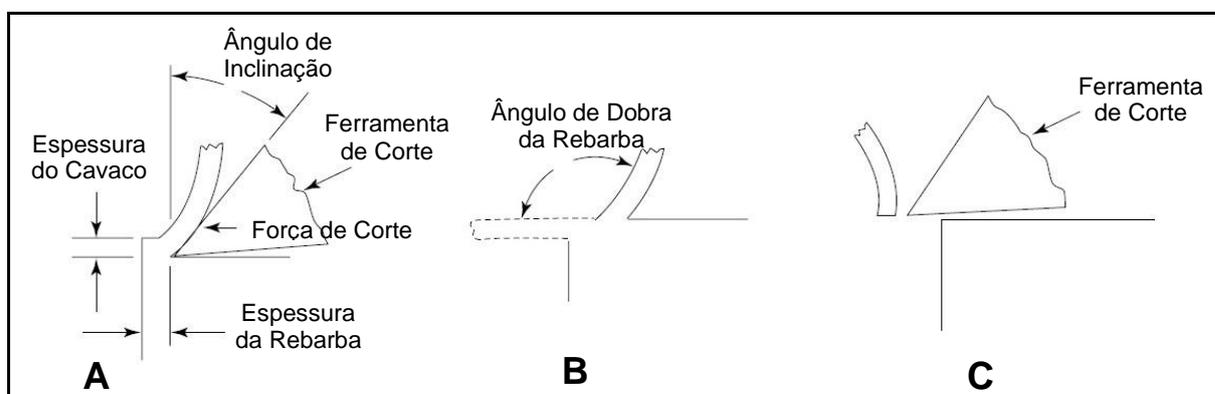
influenciado por causa das condições de corte e a plasticidade do material. Quando a tensão de cisalhamento exceder a de dobramento, uma fratura acontece, removendo a rebarba ou gerando uma rebarba pequena (figura 8 (C)).

Figura 7 – Formação das Rebarbas de Poisson (A) e Entrada (B)



Fonte: Adaptado de Gillespie (1999)

Figura 8 – Formação da Rebarba de Rolagem



Fonte: Adaptado de Gillespie (1999)

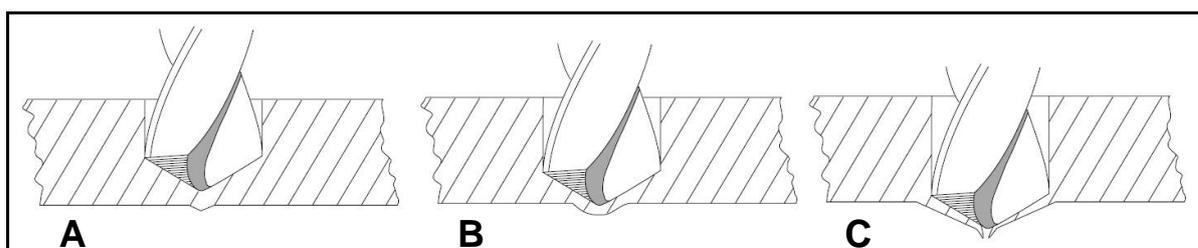
2.4.1 Rebarba no Processo de Furação

Assim como furação é um processo de usinagem muito comum, as rebarbas associadas a ele são bastante frequentes.

Essas imperfeições são geradas quando a broca entra e sai do furo, e se formam tanto na superfície superior (rebarba de entrada) quanto inferior (rebarba de saída) do furo (quando o furo é passante). As rebarbas de entrada são o resultado de rasgar, uma ação de flexão seguido de corte limpo ou extrusão lateral (assim como as rebarbas de Poisson) (GILLESPIE, 1999). Porém, os principais problemas

apresentados no processo estão na superfície inferior, onde as maiores rebarbas aparecem. Quando formadas dentro dos furos, a rebarbação fica muito complicado de realizar, fazendo-se necessário o uso de ferramentas especiais, aumentando ainda mais o custo do processo (STEIN, 1995; STEIN, 1996 apud KO; CHANG; YANG, 2003). A figura 9 traz um esquema da formação de rebarba de saída. É possível observar na figura 9 (C) que o material na porção inferior do furo pode sofrer uma flexão e dobrar, formando rebarbas de rolagem.

Figura 9 – Formação de Rebarba de Saída



Fonte: Adaptado de Gillespie (1999)

Antes de alterar algum parâmetro a fim de diminuir a formação de rebarba, é importante conhecer os principais causadores destas imperfeições, para depois avaliar seus efeitos.

2.4.2 Fatores que Influenciam na Formação de Rebarba

Os processos de usinagem geram rebarbas ao longo da produção de peças, tendo como principais fatores os parâmetros de corte, geometrias e caminho da ferramenta (KIM; MIN; DORNFELD, 2001). As características do material a ser usinado também possuem grande importância na geração das rebarbas, como os valores de resistência a tração, limite de escoamento, resistência ao cisalhamento e alongamento.

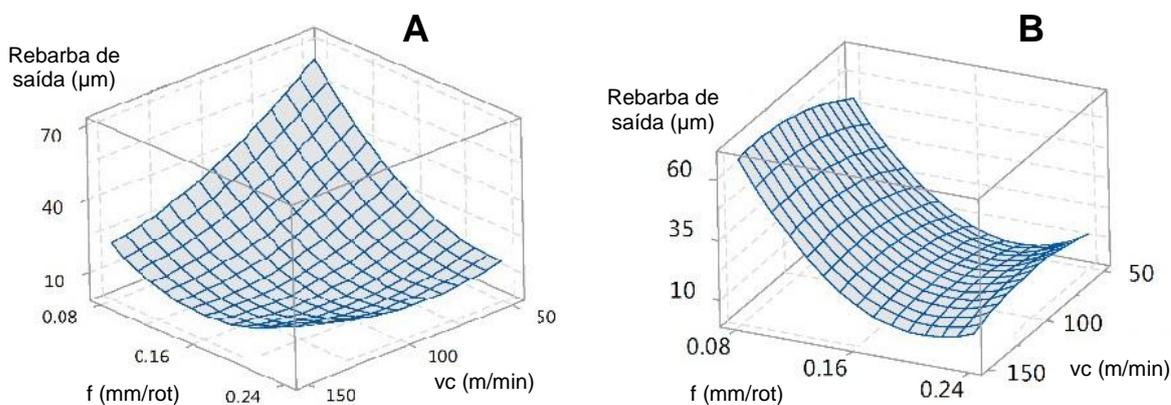
Materiais frágeis geram pouca rebarba durante o processo, devido à baixa capacidade de deformação plástica. Em contrapartida, os materiais dúcteis são mais propícios a formação das rebarbas, por se tratar de materiais com alto valor de deformação plástica (SOARES FILHO, 1995).

O avanço da ferramenta afeta a força de empuxo, que determina a quantidade de material que sofre deformação plástica no final do processo de furação, portanto, quanto maior o avanço, maior será a força de empuxo. Já a velocidade de corte afeta a geração de calor na aresta de corte. Altas temperaturas influenciam as propriedades do material, além de afetar o desgaste da quina da ferramenta, que possui grande influência na formação de rebarbas no processo de furação (KIM; MIN; DORNFELD, 2001).

A alteração de parâmetros a fim de encontrar uma menor rebarba é tão complexa que quando é alterado uma variável é possível reduzir a espessura da rebarba, porém, a altura pode aumentar na mesma proporção (GILLESPIE, 1999).

Diversos trabalhos têm sido realizados para avaliar a influência de diferentes fatores na qualidade dos furos e formação de rebarbas. Abdelhafeez et al. (2015) realizou um estudo na formação de rebarbas com duas ligas de alumínio, o Al 7010-T7451 e o Al 2024-T351. Conforme figura 10, é possível observar a variação da rebarba em função da velocidade de corte (vc) e do avanço (f) para os dois tipos de alumínio. A liga 7010 (figura 10 (A)) obteve uma menor rebarba quando utilizado o avanço de 0,16mm/rot para uma velocidade de corte de 150m/min. Na liga 2024 (figura 10 (B)) o avanço de 0,08mm/rot obteve uma rebarba muito superior quando comparada com a liga 7010, e as menores rebarbas foram obtidas para um avanço próximo de 0,20mm/rot.

Figura 10 – Relação Entre a Altura da Rebarba de Saída, Velocidade de Corte e Avanço: (A) Al 7010, (B) Al 2024



Fonte: Adaptado de Abdelhafeez et al. (2015)

Kim; Min e Dornfeld (2001) em sua pesquisa com furação das ligas AISI 304L e AISI 4118, afirmam que o diâmetro da broca não afeta as rebarbas pequenas, porém nas rebarbas maiores, este fator é determinante.

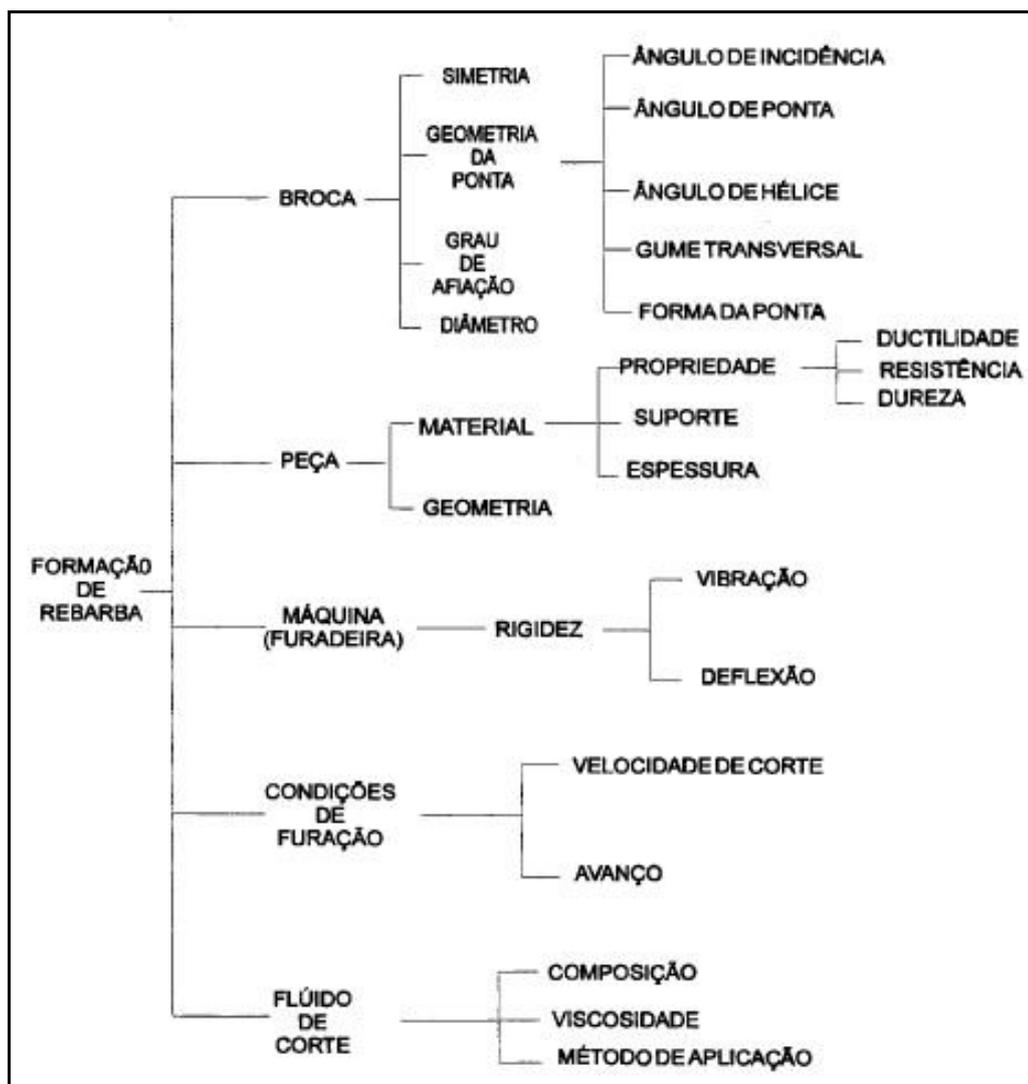
Ko e Lee (2001) realizaram uma pesquisa no alumínio puro e nas ligas SM20C, Al6061 e SM45C, para diminuir o tamanho da rebarba o ângulo de ponta da broca foi aumentado, passando de 118° para 140°.

Lauderbaugh (2009) estudou a formação de rebarbas nas ligas de alumínio 2024-T351 e 7075-T6 e concluiu que o avanço é o fator mais significativo na altura da rebarba. Conforme o diâmetro da broca aumenta, a força e empuxo e conseqüentemente o tamanho da rebarba também aumentam. O ângulo de ponta também tem efeito significativo na altura das rebarbas.

No seu estudo na furação do alumínio 6063-0, Soares Filho (1995) chegou ao resultado de que com o aumento do ângulo de hélice, a altura e a espessura das rebarbas diminuíram consideravelmente, com exceção de quando foram combinados o ângulo de hélice de 45° e o ângulo de ponta de 100°.

Além da geometria da ferramenta, dos parâmetros de corte e das características do material usinado, a formação de rebarba pode ser influenciada por outros fatores. Soares Filho (1995) mostra que a rebarba também sofre influência da lubrificação e rigidez da máquina, conforme figura 11.

Figura 11 – Fatores que Contribuem para a Formação de Rebarba na Furação



Fonte: Soares Filho (1995)

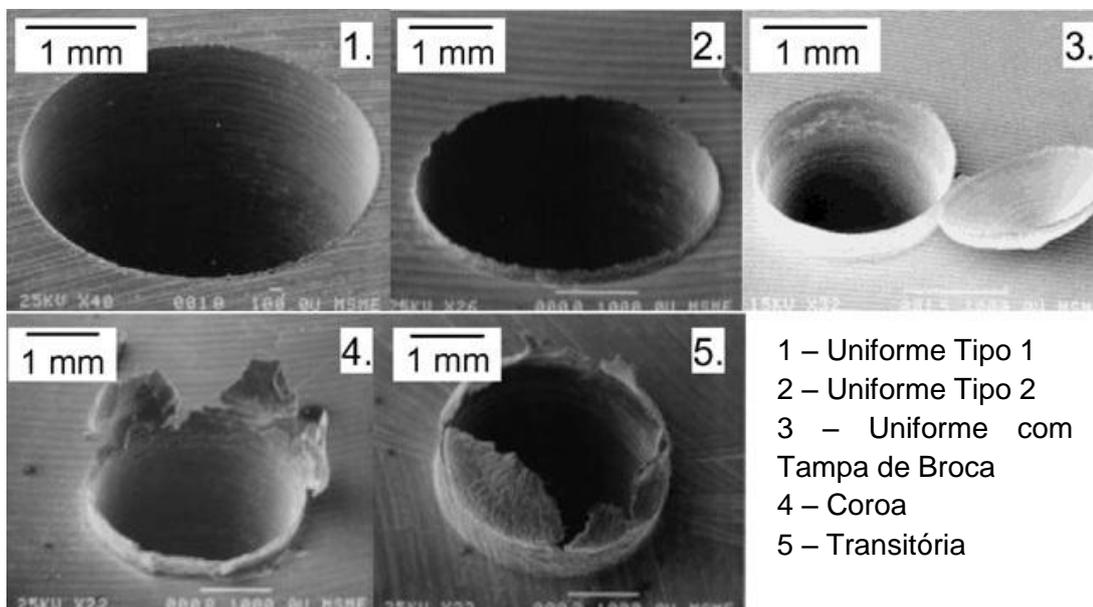
2.4.3 Tipos de Rebarbas

Segundo Kim; Min e Dornfeld (2001) os tipos de rebarbas são importantes porque de acordo com o tamanho, o custo da rebarbação pode aumentar. Seu estudo gerou uma classificação conforme os formatos gerados e são indicados na figura 12.

As rebarbas tipo 1 e 2 são uniformes e apresentam altura e espessura pequenas ao redor da periferia do furo. A rebarba tipo 3 também apresenta forma uniforme, porém uma tampa é formada ao final da perfuração, onde o material que sobra é dobrado e empurrado para fora formando a tampa de broca. As rebarbas

tipo coroa possuem alturas irregulares e maiores que as uniformes. As rebarbas transitórias são aquelas que a ruptura demora a ocorrer, criando uma seção uniforme maior (KIM; MIN; DORNFELD, 2001).

Figura 12 – Rebarbas de Furação Segundo Kim; Min; Dornfeld

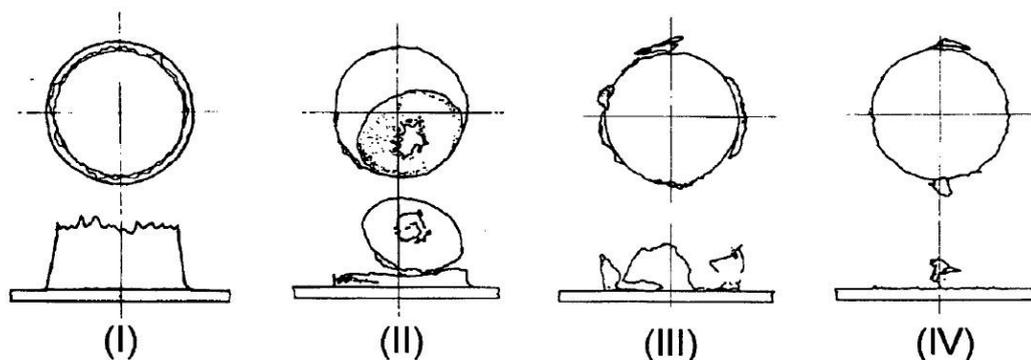


Fonte: Adaptado de Aurich et al. (2009)

Em seu estudo com furação de chapas, Shikata (1980) classificou as rebarbas em quatro tipos conforme apresentado na figura 13.

As rebarbas tipo I apresentam altura e espessura grandes, tornando sua remoção difícil, possuindo altura uniforme, e as pontas com aspecto de dentilhado. A tipo II possui duas partes, uma parte fixa a peça com altura e espessura uniforme e outra com formato de tampa, que pode ou não ficar aderido a peça. A tipo III apresenta forma irregular, com espessura fina e altura variável. A tipo IV é uma rebarba com pouco volume de material, com pequenas projeções que se soltam facilmente e as demais regiões do furo apresenta altura regular pequena.

Figura 13 – Rebarbas de Furação Segundo Shikata



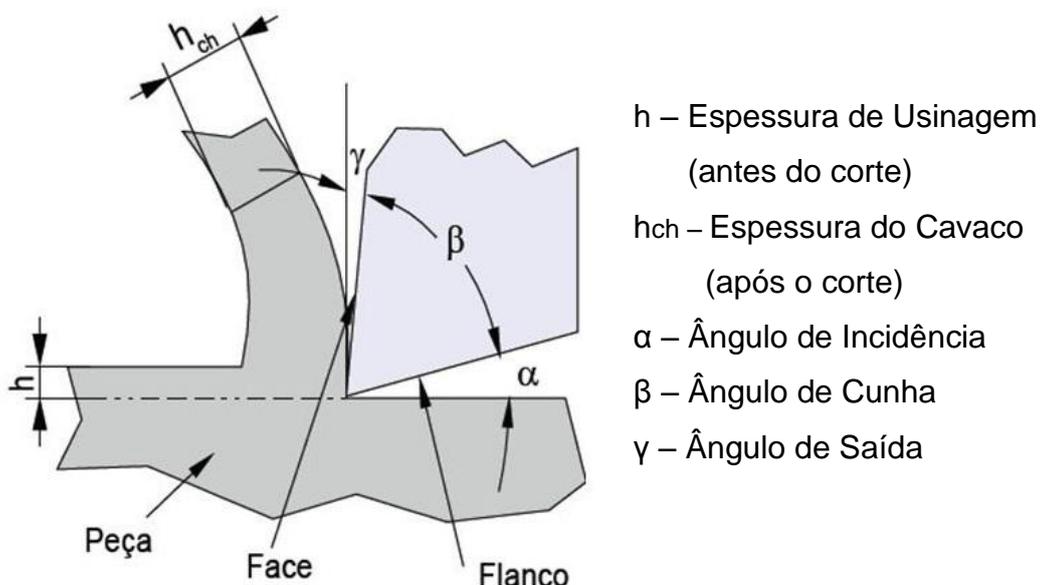
Fonte: Soares Filho (1995)

2.5 Formação do Cavaco

Assim como uma menor rebarba no processo de furação é desejável, a formação de cavacos está na mesma situação, já que ambos os casos, tanto o tamanho quanto o tipo, afetam diretamente o processo num todo.

Para que a formação do cavaco aconteça, no início de corte da usinagem, a cunha da ferramenta penetra no material da peça, gerando deformação elástica e plástica. Após ultrapassar a tensão de cisalhamento máxima, o material começa a escoar. Por causa da geometria de corte, essa deformação passa a gerar cavacos que deslizam sobre a face de cunha de corte. A figura 14 traz os principais elementos da cunha de corte na formação dos cavacos (WEINGAERTNER; SCHOROETER,1990).

Figura 14 – Esquema da Cunha de Corte na Formação do Cavaco



Fonte: Adaptado de Weingaertner e Schoroeter (1990, p. 34)

Vários fatores do processo de usinagem são influenciados pela formação do cavaco, como o desgaste da ferramenta, esforços de corte, temperatura de usinagem, penetração do fluido de corte, entre outros. Isso afeta diretamente questões como qualidade da peça, aspectos econômicos, uso adequado da máquina-ferramenta, além de segurança para o operador (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

O cavaco é formado em velocidades elevadas de deformação, seguida de ruptura do material. Este processo divide-se em quatro etapas: o recalque inicial, deformação e ruptura, deslizamento das lamelas e saída do cavaco (MACHADO et al. 2011).

- Recalque inicial é onde uma pequena quantidade de material é pressionada contra a superfície de saída da ferramenta, durante a penetração da cunha cortante;
- Deformação e ruptura ocorre quando o material sofre uma deformação elástica seguida de uma plástica enquanto é pressionado pela ferramenta, até gerar tensões que provoquem a ruptura do material, que acontece na maior parte dos casos, por cisalhamento;
- O deslizamento das lamelas acontece enquanto ainda há penetração da ferramenta, ocorrendo a ruptura parcial ou completa, junto com as condições de

velocidade de corte e avanço determinam quanto material rompido permanecerá unido ao cavaco recém-formado, originando os cavacos contínuos ou descontínuos;

- Saída do cavaco ocorre devido ao movimento relativo entre a ferramenta e a peça, onde uma porção de material deformado e rompido escorrega sobre a superfície de saída da ferramenta. Enquanto este evento acontece, uma nova lamela está se formando e passando pelos mesmos processos do anterior.

O controle de cavaco tem papel de grande importância no processo produtivo, podendo influenciar a produtividade em produções em série. Um dos fatores para que isso ocorra, é a formação de cavacos longos, que ocasionam problemas no acabamento superficial, além do aumento da força de corte que afeta diretamente a vida útil da ferramenta (STEMMER, 2005).

2.5.1 Cavaco no Processo de Furação

O processo de furação traz como problema a saída dos cavacos de dentro do furo. Quando não formados adequadamente, acabam causando entupimento, aumentando o momento torsor e, conseqüentemente, a quebra da ferramenta. Por isso é de fundamental importância induzir o processo a gerar cavacos com formato de fácil remoção. Casos como os em forma de fita são de difícil extração (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Segundo Diniz; Marcondes e Coppini (2013) utilizando ciclos de furação, onde a broca é retirada frequentemente de dentro do furo durante o processo, auxilia a remoção dos cavacos, entretanto, ocorre aumento do tempo de corte. Outro fator que ajuda essa retirada de cavaco é a utilização de brocas com canais para fluídos, que são insuflados sob pressão no fundo do furo. Outros fatores como avanço, velocidade de corte e ângulos da ferramenta, quando utilizados de maneira adequada para cada tipo de material, também auxiliam na saída dos cavacos.

2.5.2 Classificação dos Cavacos

Muitos problemas têm relação com a forma do cavaco produzido durante a usinagem, como a segurança do operador, dano à ferramenta e a peça, manuseio e armazenamento do cavaco, forças de corte, temperatura e vida útil da ferramenta. Por estes motivos muitos estudos existem a fim de aumentar a capacidade de quebra do cavaco dos materiais (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013). Assim é necessário identificar a forma e tipo do cavaco em cada processo. Muitas classificações dos cavacos existem, mas conforme Ferraresi (1970), a mais utilizada é a que se divide em três tipos:

- Cavaco contínuo: são constituídos de lamelas justapostas em uma disposição contínua, onde são agrupados em grupos lamelares. Mais comuns em materiais dúcteis, onde o ângulo de saída tende a assumir valores elevados;
- Cavaco de cisalhamento: constituídos de grupos lamelares distintos e justapostos. Foram cisalhados na região de cisalhamento e soldados parcialmente em seguida. Normalmente formado em materiais dúcteis;
- Cavaco de ruptura: constituídos de fragmentos que foram arrancados da peça usinada. Alguns grupos lamelares apresentam ruptura do material, onde permanecem separados. Formados em materiais frágeis.

Os cavacos também são classificados quanto à forma, e são subdivididos em helicoidais, espiral, lascas ou pedaços. A norma ISO 3685 (1993) possui uma classificação mais detalhada da forma dos cavacos, conforme figura 15 (MACHADO et al., 2011).

Figura 15 – Classificação dos Cavacos Quanto à Forma Conforme ISO 3685

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

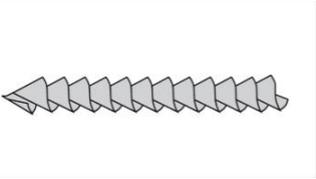
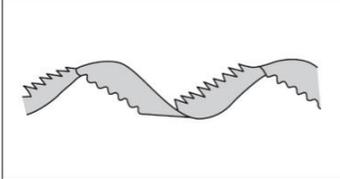
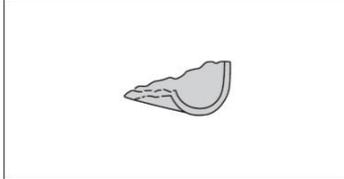
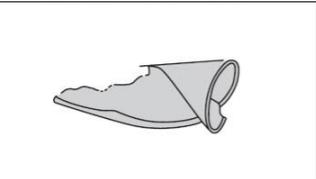
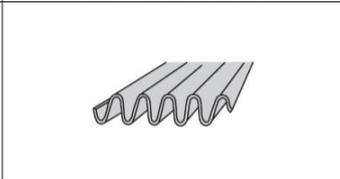
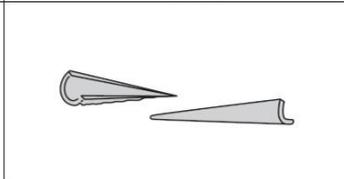
Fonte: Machado et al. (2001, p. 72)

O fabricante de ferramentas Mitsubishi® (2018) apresenta uma classificação dos cavacos específico para o processo de furação, diferente da apresentada pela norma ISO, que trata de uma classificação universal para os processos de fabricação. Esses cavacos de furação são divididos em seis formatos (figura 16):

- Espiral Cônico: o cavaco é enrolado no canal da broca a medida que é cortado pela aresta. Obtêm uma expulsão satisfatória quando o cavaco se rompe com poucas voltas. Encontrados principalmente na usinagem de materiais dúcteis com baixa taxa de avanço;
- Passo Longo: possui formato alongado, geralmente formado na furação de materiais maleáveis. Este formato não enrola no canal, sendo expulso da forma como é cortado. Gera problemas como o emaranhamento em torno da broca;
- Vírgula: é formado pela restrição causada pelo canal da broca e a parede do furo. Gerado quando a taxa de avanço é alta;
- Fragmento Cônico: inicialmente tem formato de cavaco tipo espiral cônico, porém com a limitação da parede do furo usinado, é quebrado antes de se alongar, devido à baixa ductilidade do material usinado. Possui bom controle e expulsão dos cavacos;
- Leque: possui forma de ziguezague devido as características do material e a geometria do canal. Este tipo de cavaco pode causar obstrução do canal;

- Agulha: formado em materiais frágeis ou quando o raio de enrolamento do cavaco é pequeno, rompendo-se com as vibrações. Apresenta boa expulsão de cavacos, porém pode causar obstrução no canal.

Figura 16 – Cavacos de Furação

		
Espiral Cônico	Passo Longo	Vírgula
		
Fragmento Cônico	Leque	Agulha

Fonte: Adaptado de Mitsubishi® (2018)

2.6 Rugosidade

A formação de rebarbas e cavacos gera imperfeições na superfície das peças. Em determinadas aplicações, essas imperfeições devem estar dentro de limites específicos, como camisas de cilindros. Devido essas exigências a necessidade de um controle se faz necessário.

A rugosidade é um conjunto de irregularidades ou erros geométricos resultantes do processo de usinagem como marcas de avanço, aresta postiça, desgaste da ferramenta e outros (MACHADO et al., 2011). Estes sofrem grandes influências de parâmetros como a geometria da ferramenta e peça, rigidez da máquina-ferramenta, material da peça e ferramenta, condições e fluido de corte (SANTOS; SALES, 2007). Guimarães (1999) afirma que, quanto maior a precisão dos ajustes, as tolerâncias geométricas diminuem, assim como as dimensionais.

Existem diversos fatores que afetam a rugosidade e podem ser avaliadas por diversos parâmetros. Santos e Sales (2007) e Machado et al. (2011) classificam estes parâmetros em amplitude, espaço e híbridos.

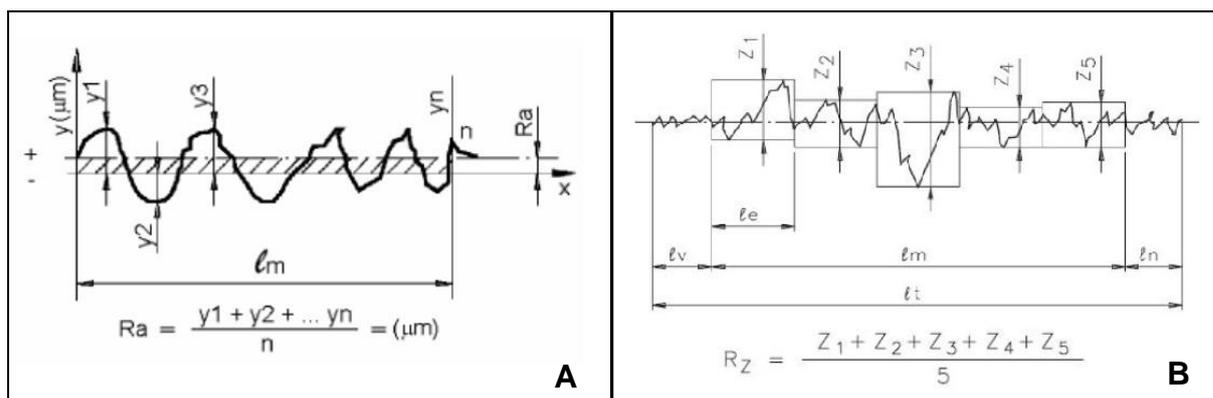
- Parâmetros de amplitude são determinados pelas alturas dos picos, profundidade dos vales, ou ambos, não considerando o espaçamento entre as irregularidades da superfície;
- Parâmetros de espaço definidos de acordo com a distância das irregularidades ao longo da superfície;
- Parâmetros híbridos é a combinação entre os parâmetros de amplitude e espaçamento.

Para medir a rugosidade algumas definições devem ser entendidas, como o comprimento de amostragem que é cada parte utilizada no cálculo dos parâmetros, a fim de assegurar a significância estatística não incluindo detalhes desnecessários. Comprimento de análise é a soma de todos comprimentos de amostragem. O comprimento total que é o mesmo que o de amostragem, porém acrescido de dois trechos a mais, um em cada extremidade, onde são desconsiderados nos cálculos. A linha de centro que é uma linha imaginária onde corta a superfície na posição onde os picos ficam acima e os vales abaixo. O *cut-off* é o máximo espaçamento entre as irregularidades que serão calculadas (SANTOS; SALES, 2007).

Para avaliação existem vários parâmetros de rugosidade, onde diversas organizações possuem normas, como a ISO, DIN e JIS. Alguns parâmetros que a ABNT NBR ISO 4287 apresenta são a Ra, Rq, Rt e Rz (MACHADO et al., 2011; SANTOS; SALES, 2007; CAVALCANTE, 2010).

- Ra: é o mais utilizado, e define-se pela média das distâncias entre a linha de centro e os pontos de superfície ao longo da amostragem. Fornece informações de uma forma geral, e tem aplicação quando o controle de rugosidade é contínuo e apresenta sulcos orientados para fins estéticos (figura 17 (A));
- Rq: definido pela raiz quadrada da média dos valores das ordenadas no comprimento avaliado;
- Rt: é a soma do pico mais alto e o vale mais profundo a partir da linha média. Pode ser aplicado em áreas de vedação, superfícies dinamicamente carregadas e de deslizamento onde o perfil efetivo é periódico;
- Rz: total da média entre os cinco maiores picos e vales do comprimento da amostragem. A norma DIN define Rz como as cinco alturas máximas em cada comprimento de amostragem (figura 17 (B)).

Figura 17 – Parâmetros de Rugosidade Ra (A) e Rz (B)



Fonte: Adaptação do Autor (2018)

Os parâmetros de usinagem de avanço e velocidade de corte tem forte influência no acabamento superficial. Utilizando baixas velocidades de corte, tende-se a formar a APC (aresta postiça de corte), que é um fenômeno causado pela aderência de material na região de corte da ferramenta gerando riscos a peça. A APC pode ser minimizada aumentando a velocidade de corte, porém o desgaste da ferramenta também pode aumentar. Conforme o avanço aumenta, a altura dos picos e a profundidade dos vales também aumentam (STEMMER, 2007).

A qualidade superficial na furação é comprometida devido a exigências do processo, como altas velocidades de corte e avanços, que conseqüentemente afetam a ferramenta. Esses aspectos diminuem o escoamento dos cavacos e a lubrificação, elevando a temperatura próximo à aresta de corte, gerando maior desgaste. Com isso, para uma boa condição no controle da rugosidade, o correto uso dos parâmetros de corte deve ser aplicado (ANDRADE, 2005 apud CAVALCANTE, 2010).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho realizou uma série de experimentos visando avaliar a formação de rebarbas, a rugosidade e o tipo de cavaco do processo de furação na liga de alumínio 6063 T5, alterando os parâmetros de avanço e velocidade de corte e dois tipos de brocas helicoidais.

Todos os experimentos e análises foram executados nas dependências do Instituto Federal de Ciências e Tecnologia de Santa Catarina, Campus Jaraguá do Sul – Rau. As furações dos corpos de prova e análise de rugosidade foram realizadas nos laboratórios de CNC e usinagem. As avaliações das rebarbas foram executadas no laboratório de Ensaios dos Materiais.

3.1 Materiais

Durante o estudo inicial, foi decidido que a liga a ser utilizada deveria ser uma em que fosse encontrada no comércio local, a fim de indicar problemas do cotidiano das empresas de usinagem da região.

O material selecionado foi o alumínio 6063 T5, adquirido no formato de barra chata, medindo 12,7x25,4x3000mm. Durante a aquisição, foi solicitado o certificado de qualidade do material ao fornecedor (Anexo A), para averiguar se os elementos presentes na composição estavam de acordo com a norma equivalente, a ABNT-NBR 6834. A tabela 1 indica o ensaio de resistência realizado pelo fabricante da liga. Os valores encontrados na composição química do material utilizado estão descritos na tabela 2.

Tabela 1 – Ensaio de Resistência Mecânica do Alumínio 6063 T5

Ensaio	Unid. Medi	Mínimo	Máximo	Encontrado
Alongamento	%	8	>>>	23,32
Limite Escoamento	MPa	110	>>>	206,62
Limite Resistência	MPa	150	>>>	232,81

Fonte: Shock Metais® (2017)

Tabela 2 – Composição Química do Alumínio 6063 T5

	Unid. Medi	Mínimo	Máximo	Encontrado
Cr	%	<<<	0,100	0,010
Cu	%	<<<	0,100	0,010
Fe	%	<<<	0,350	0,220
Mg	%	0,450	0,900	0,490
Mn	%	<<<	0,100	0,020
Outros	%	<<<	0,150	0,000
Si	%	0,200	0,600	0,480
Ti	%	<<<	0,100	0,020
Zn	%	<<<	0,100	0,000
Al				Restante

Fonte: Shock Metais® (2017)

3.2 Ferramentas de Corte

Foram selecionados dois tipos de brocas helicoidais para realização dos experimentos, ambas com diâmetro de 10mm. A primeira foi a broca do tipo N, a mais comum do mercado e mais utilizada pelas indústrias em geral para este processo de fabricação. A segunda, a tipo W, indicada para furação em alumínio, porém se trata de uma ferramenta com maior custo e menor utilização no mercado.

As brocas foram utilizadas conforme fornecidas, sem haver qualquer modificação na sua forma, como afiação ou revestimento especial.

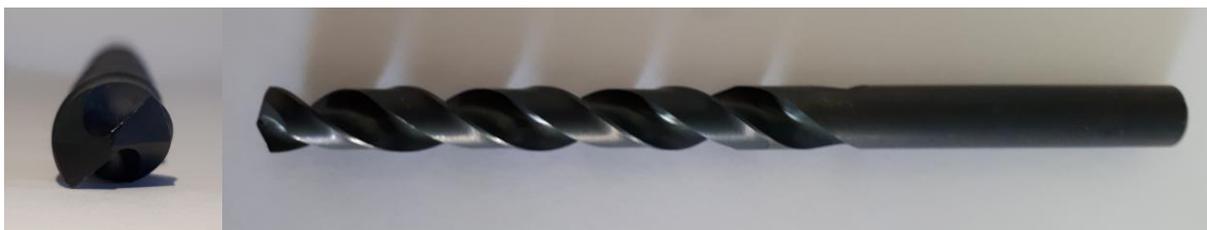
A tipo N (figura 18), da marca Irwin®, apresenta uma geometria com ângulo de hélice de 30° e ângulo de ponta de 118° com afiação normal, fabricada em aço rápido. A tipo W (figura 19) possui ângulo de hélice de 40° e ângulo de ponta de 135° com afiação tipo cruz, da fabricante Rocast®, também em aço rápido além de possuir um tratamento de enegrecimento, onde altera a cor da broca, deixando com aspecto semelhante a um metal duro.

Figura 18 – Broca Tipo N



Fonte: o Autor (2018)

Figura 19 – Broca Tipo W



Fonte: o Autor (2018)

3.3 Equipamentos

Os corpos de prova foram usinados em um centro de usinagem de três eixos da marca Romi®, modelo D600. O equipamento possui eixo-árvore vertical, com rotação máxima de 7000rpm com potência de 15kW / 20cv, cone do eixo árvore ISO 40 e comando Fanuc™ Series Oi-MC.

Para análise da rugosidade dos furos, foi utilizado um rugosímetro da marca Tesa®, modelo Rugosurf 20. Para configuração e calibração do equipamento, foi consultado o manual do rugosímetro.

A avaliação das rebarbas foi realizada em um estereoscópio do fabricante Zeiss®, modelo Stemi 2000-C, com uma câmera acoplada Axio Cam ER 5s e ampliação de 5 vezes (figura 20).

Figura 20 – Estereoscópio

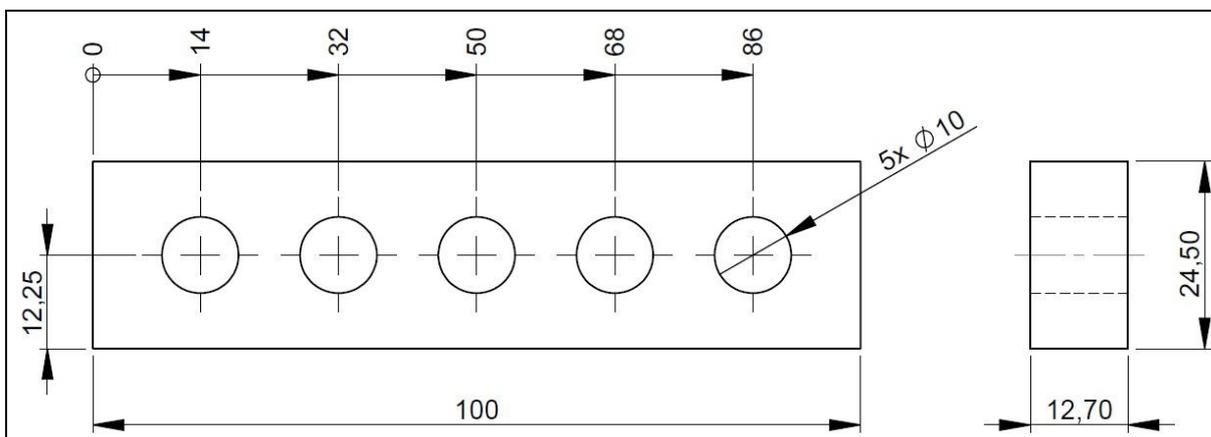


Fonte: o Autor (2018)

3.4 Corpo de Prova

Os corpos de provas foram cortados em barras de 12,7x25,4x100mm e realizados 5 furos (em cheio e passantes) para cada variação de parâmetro. A posição de cada furo foi usinada conforme figura 21 (dimensões em milímetros).

Figura 21 – Corpo de Prova



Fonte: o Autor (2018)

3.5 Parâmetros de Corte

Os parâmetros de corte foram selecionados conforme a faixa de velocidades recomendadas pelos fabricantes e segundo avaliação de algumas pesquisas prévias da literatura. Em seu estudo com o alumínio 7075 e utilização de brocas helicoidais de 10mm de diâmetro, Vieira et al. (2015) utiliza as taxas de avanço de 0,05, 0,15 e 0,30mm/rot, a mesma variação aplicada nesta pesquisa, e velocidades de corte de 10, 25 e 40m/min. Soares Filho (1995) avaliou chapas de Al 6063 com 3mm de espessura e utilizou quatro faixas de avanço (0,047, 0,125, 0,25 e 0,5mm/rot).

SKF® (1989), traz algumas faixas de velocidade de corte, onde na utilização de ligas de alumínio sem silício, para gerar cavacos longos recomenda-se de 63 a 100m/min, e para geração de cavacos curtos de 40 a 63m/min.

Weingaertner e Schoroeter (1990) recomendam para a furação com brocas helicoidais e ligas de alumínio com teor de silício menor que 12% velocidades de corte de 80 a 120m/min e avanço de 0,02 a 0,5mm/rot.

A tabela 3 traz os parâmetros e variáveis utilizados para realizar o estudo. O número de ensaios e a disposição de como foi realizado cada corpo de prova está disposto na tabela 4.

Tabela 3 – Variáveis do Processo

Variáveis			
Avanço (mm/rot)	0,05	0,15	0,30
Velocidade de corte (m/min)	40	63	100
Tipo de Broca	N	W	

Fonte: o Autor (2018)

Tabela 4 – Parâmetros de Corte

nº Amostra	f (mm/rot)	vc (m/min)	Tipo Broca
1	0,05	40	N
2	0,05	63	N
3	0,05	100	N
4	0,15	40	N
5	0,15	63	N
6	0,15	100	N
7	0,30	40	N
8	0,30	63	N
9	0,30	100	N
10	0,05	40	W
11	0,05	63	W
12	0,05	100	W
13	0,15	40	W
14	0,15	63	W
15	0,15	100	W
16	0,30	40	W
17	0,30	63	W
18	0,30	100	W

Fonte: o Autor (2018)

3.6 Métodos

Foi adotado como critério de ensaio a troca de ferramenta após a abertura de 15 furos, devido ao baixo nível de desgaste da broca em relação ao alumínio. Esta definição está de acordo com o trabalho de Abdelhafeez et al. (2015) que adotou como critério de vida útil da ferramenta a realização de até 60 furos ou desgaste de flanco de 0,1mm, e após a realização dos 60 furos, a ferramenta não apresentou desgaste perceptível, apesar da utilização de ligas mais duras em seus experimentos, como os aluminios 7010 e 7050.

Todo ensaio de usinagem foi realizado com refrigeração. O refrigerante utilizado foi o óleo solúvel semi-sintético Lub Kort do fabricante Ayvore®, com

diluição de 10%. A aplicação do fluido foi realizada através de dois jatos direcionados entre a peça e a ferramenta.

Durante os ensaios de furação, os corpos de prova foram fixados de modo a permanecer rígido e não sofrer flexão durante a entrada da broca na peça, como mostra a figura 22.

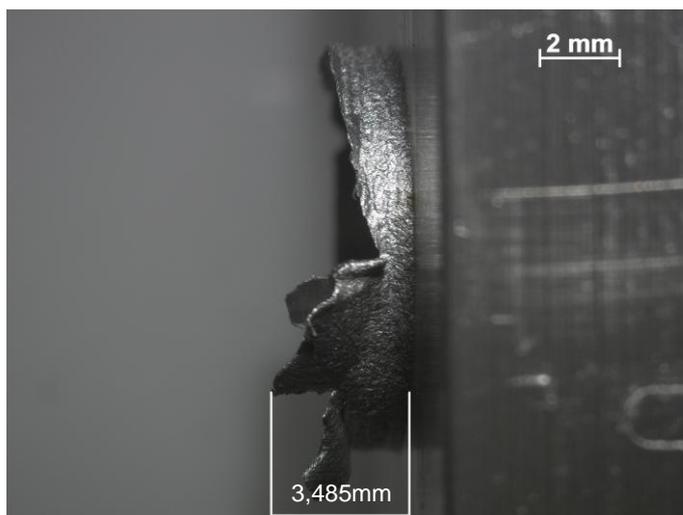
Figura 22 – Fixação do Corpo de Prova



Fonte: o Autor (2018)

Foram avaliadas apenas as rebarbas de saída, sendo adotado como critério de medição a altura máxima da rebarba em cada furo, conforme figura 23. A classificação das rebarbas foi realizado de acordo com o método desenvolvido por Kim, Min e Dornfeld (2001) conforme figura 12.

Figura 23 – Método de Medição da Altura da Rebarba



Fonte: o Autor (2018)

Foi gerado uma média das alturas das rebarbas dos cinco furos de cada corpo de prova e utilizado este valor como resultado. Com os resultados gerou-se uma análise de variância (ANOVA). A ANOVA foi realizada no software Minitab™ e alimentado com as alturas das rebarbas encontradas em cada furo.

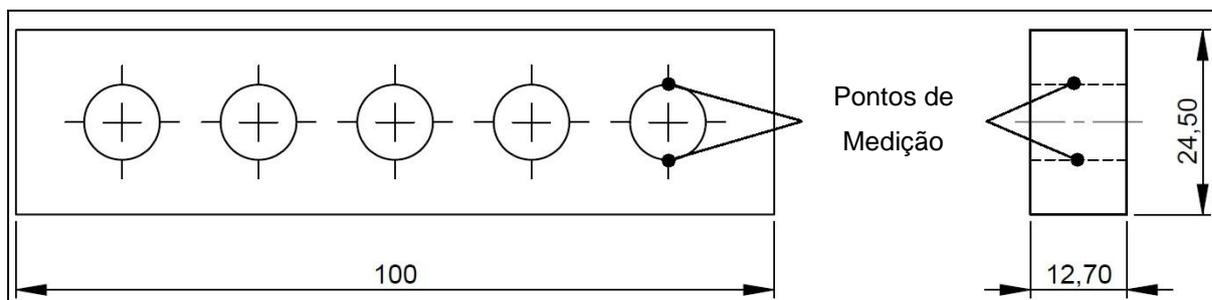
Para realizar a medição de rugosidade, a peça foi presa em uma fresadora convencional para garantir um melhor posicionamento (figura 24). Foi utilizado como parâmetro de avaliação a rugosidade Ra, com *cut-off* de 2,5mm. Para cada furo foi realizado a medição em dois pontos distantes a 180°, conforme figura 25 (dimensões em milímetros), depois realizado uma média dos 10 resultados como valor final de cada amostra.

Figura 24 – Avaliação da Rugosidade



Fonte: o Autor (2018)

Figura 25 – Pontos de Medição da Rugosidade



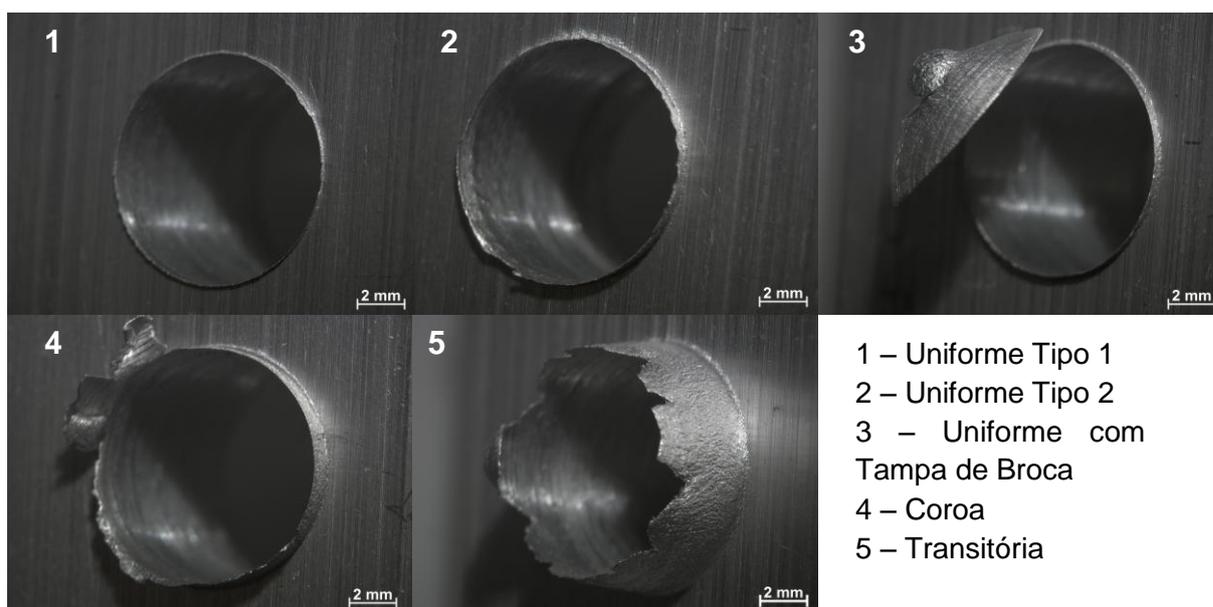
Fonte: o Autor (2018)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Classificação das Rebarbas

A figura 26 mostra os cinco tipos diferentes de rebarbas obtidos nos ensaios realizados e sua classificação.

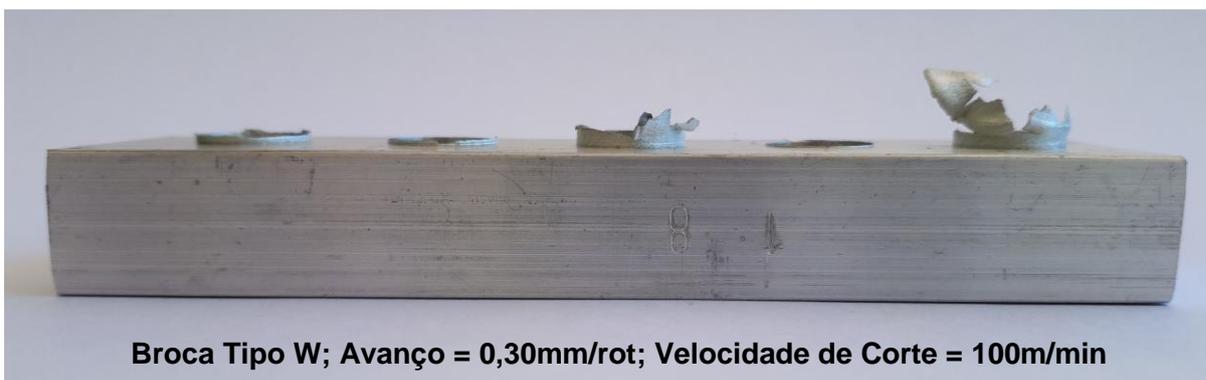
Figura 26 – Tipos de Rebarbas



Fonte: o Autor (2018)

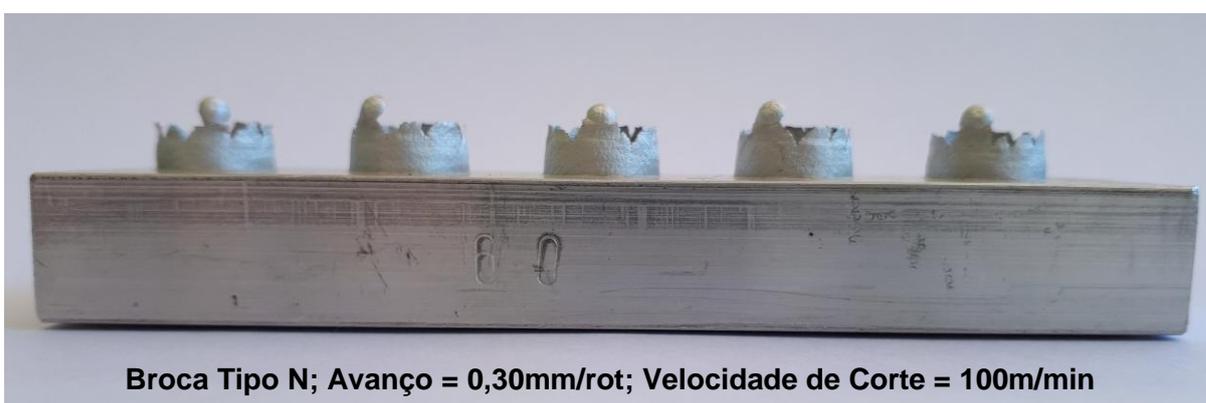
Todos os furos gerados em cada amostra foram analisados, mesmo quando uma única amostra apresentou mais de um tipo de rebarba. A figura 27 traz a amostra 18, onde mais de um tipo de rebarba foi encontrada. A figura 28 apresenta a amostra 9, onde apenas um tipo de rebarba foram encontradas.

Figura 27 – Amostra 18 – Dois Tipos de Rebarbas Encontradas



Fonte: o Autor (2018)

Figura 28 – Amostra 9 – Um Tipo de Rebarba Encontrada



Fonte: o Autor (2018)

Como método para diferenciar as rebarbas uniformes, a tipo 1 foram consideradas as rebarbas com até 0,3mm de altura máxima, e a tipo 2 com altura maior que 0,3mm e menor que 1mm. Estes valores estão próximos aos utilizados por Kim, Min e Dornfeld (2001).

Saber o tipo da rebarba formada é um método visual de avaliar o volume gerado. Segundo Kim, Min e Dornfeld (2001), quanto menor o volume a ser removido, mais rápido e fácil será o processo de rebarbação, consequentemente gerando menor custo do processo.

A tabela 5 mostra todos os tipos de rebarbas encontradas nos cinco furos de cada uma das dezoito amostras avaliadas. É possível verificar que o tipo mais comum encontrado foi a rebarba coroa, seguida pelo uniforme tipo 2.

Tabela 5 – Tipos de Rebarbas Encontradas

nº Amostra	Furo 1	Furo 2	Furo 3	Furo 4	Furo 5	Predominante
1	Coroa	Coroa	Coroa	Coroa	Coroa	Coroa
2	Coroa	Coroa	Coroa	Coroa	Coroa	Coroa
3	Coroa	Coroa	Coroa	Coroa	Coroa	Coroa
4	Uniforme Tipo 2	Uniforme Tipo 2	Uniforme Tipo 2	Tampa de Broca	Uniforme Tipo 2	Uniforme Tipo 2
5	Uniforme Tipo 2	Uniforme Tipo 2	Tampa de Broca	Tampa de Broca	Tampa de Broca	Tampa de Broca
6	Coroa	Coroa	Coroa	Coroa	Coroa	Coroa
7	Coroa	Coroa	Coroa	Coroa	Tampa de Broca	Coroa
8	Transitória	Transitória	Transitória	Transitória	Transitória	Transitória
9	Transitória	Transitória	Transitória	Transitória	Transitória	Transitória
10	Coroa	Coroa	Coroa	Coroa	Coroa	Coroa
11	Coroa	Uniforme Tipo 2	Uniforme Tipo 2	Coroa	Uniforme Tipo 2	Uniforme Tipo 2
12	Uniforme Tipo 2	Uniforme Tipo 2				
13	Uniforme Tipo 1	Coroa	Uniforme Tipo 1	Uniforme Tipo 1	Uniforme Tipo 1	Uniforme Tipo 1
14	Uniforme Tipo 1	Uniforme Tipo 1	Uniforme Tipo 2	Uniforme Tipo 2	Uniforme Tipo 2	Uniforme Tipo 2
15	Uniforme Tipo 2	Uniforme Tipo 1	Uniforme Tipo 2	Uniforme Tipo 2	Uniforme Tipo 2	Uniforme Tipo 2
16	Tampa de Broca	Coroa	Uniforme Tipo 2	Tampa de Broca	Coroa	Tampa de Broca; Coroa
17	Uniforme Tipo 2	Uniforme Tipo 2				
18	Uniforme Tipo 2	Uniforme Tipo 2	Coroa	Uniforme Tipo 2	Coroa	Uniforme Tipo 2

Fonte: o Autor (2018)

4.2 Altura das Rebarbas

Para medição das rebarbas, foi considerado apenas o ponto mais alto da rebarba de cada furo e gerada uma tabela com a média e desvio padrão de cada amostra, conforme tabela 6.

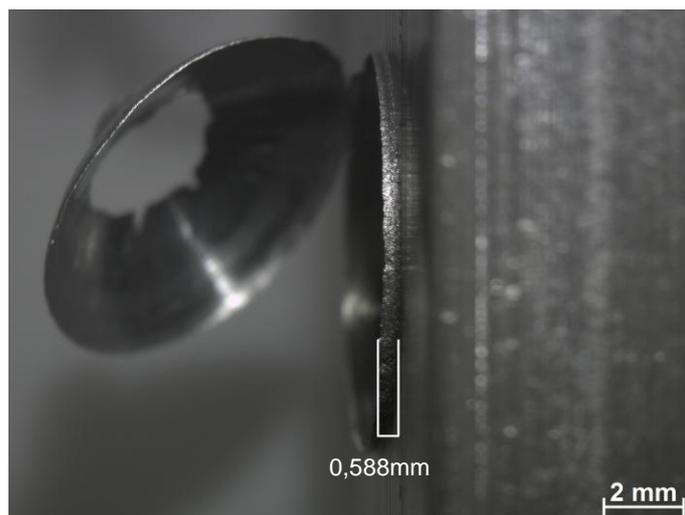
Durante a análise das alturas, as rebarbas do tipo uniforme com tampa de broca, as tampas foram removidas, devido a característica diferente deste tipo de rebarba, como a fragilidade, facilidade de remoção e grande dimensão. Em seu estudo na furação de chapas, Shikata (1980) encontrou esse mesmo tipo de rebarba (tampa de broca), e relatou que a tampa pode ou não ficar aderida na peça, chamando-a de rebarba/cavaco. Nos furos com essa formação, apenas a rebarba uniforme existente foi considerada na medição, conforme mostra figura 29.

Tabela 6 – Altura Média das Rebarbas

nº Amostra	Média das Alturas (mm)	Desvio Padrão (mm)
1	3,345	2,595
2	3,678	0,625
3	4,461	1,395
4	0,700	0,412
5	0,616	0,070
6	5,188	1,139
7	5,619	3,238
8	6,354	0,543
9	6,778	0,197
10	3,023	3,099
11	3,815	4,617
12	0,580	0,111
13	0,842	1,422
14	0,504	0,248
15	0,314	0,116
16	1,134	0,608
17	0,650	0,176
18	2,614	3,049

Fonte: o Autor (2018)

Figura 29 – Medição das Rebarbas Tipo Tampa de Broca



Fonte: o Autor (2018)

A partir dos resultados obtidos, foi realizado uma análise de variância (ANOVA) com nível de confiança de 95%, para verificar a importância dos fatores tipo de broca, avanço e velocidade de corte na formação das rebarbas durante a furação. Os resultados encontrados estão dispostos na tabela 7.

Tabela 7 – Análise das Alturas das Rebarbas - ANOVA

Fator de Variação	DF	SS	MS	F	P
Avanço	2	99,391	49,695	10,12	<0,001
Velocidade de Corte	2	13,154	6,577	1,34	0,268
Broca	1	150,350	150,350	30,60	<0,001
Erro	84	412,691	4,913		
Total	89	675,586			

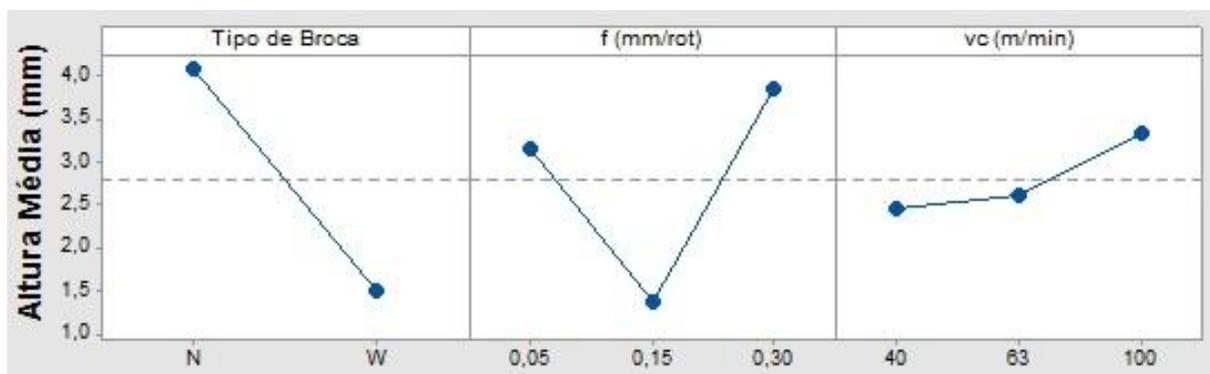
Fonte: o Autor (2018)

Conforme análise realizada, para o avanço, o valor “P” ficou inferior a 0,05. Isso significa que, com uma confiabilidade de 95%, este fator influencia na altura da rebarba, da mesma forma o tipo de broca também influencia na altura da rebarba.

Para a velocidade de corte, como o valor “P” ficou acima de 0,05 indica que não há evidência suficiente para afirmar que este fator influencia na altura da rebarba.

A figura 30 traz um gráfico gerado a partir da ANOVA comparando o efeito de cada fator avaliado em relação à altura das rebarbas geradas.

Figura 30 – Efeito dos Fatores na Formação de Rebarbas



Fonte: o Autor (2018)

Conforme análise da figura 30, o tipo de broca tem um grande efeito na formação de rebarbas, pois além da variação do ângulo de hélice de 30° (broca tipo N) para 40° (broca tipo W), temos a variação do ângulo de ponta, que na broca N é 118° e na broca W 135° . Este resultado está de acordo com os obtidos por Soares Filho (1995), onde o aumento do ângulo de hélice tem grande influência na diminuição das rebarbas geradas. Ko e Lee (2001) afirmam em seu estudo que o aumento do ângulo de ponta diminui o tamanho das rebarbas geradas.

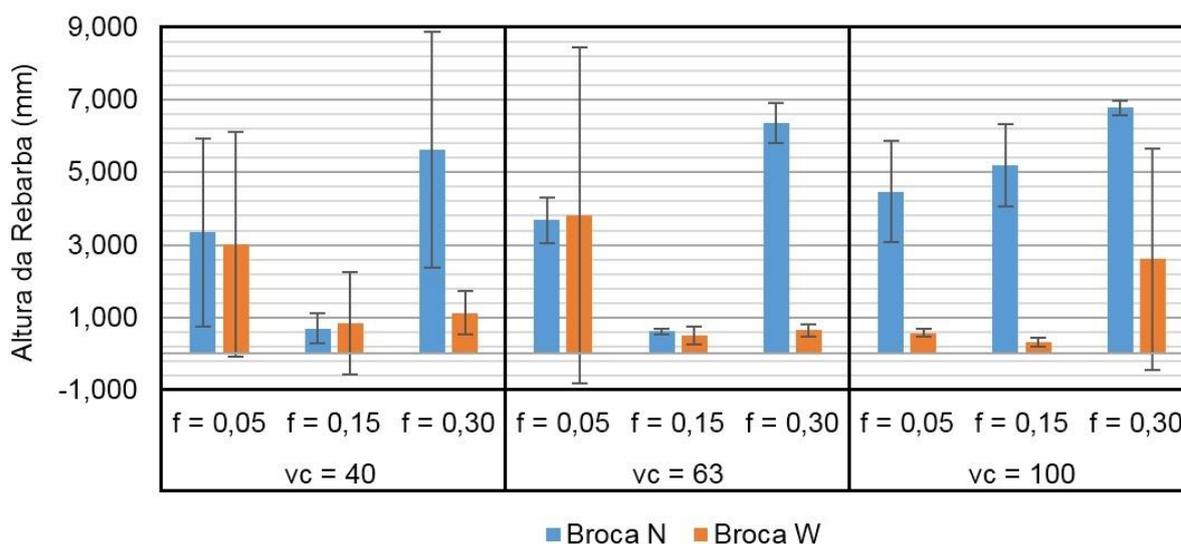
Em relação ao avanço, as menores rebarbas foram obtidas quando utilizado a taxa de $0,15\text{mm/rot}$. Com avanço de $0,05\text{mm/rot}$ obteve-se uma rebarba intermediária e com avanço $0,30\text{mm/rot}$ uma rebarba maior. Este resultado está de acordo com o obtido por Abdelhafeez et al. (2015), apresentado na figura 10, onde mostra que os valores intermediários de avanço foram obtidos as menores rebarbas, tanto na liga de alumínio 7010, quanto na liga 2024, e em ambos os materiais, a menor taxa de avanço ($0,08\text{mm/rot}$) foi encontrado as maiores rebarbas. Em seu estudo com furação de chapas de alumínio 6063 com 3mm de espessura, Soares Filho (1995) chegou a um resultado diferente ao encontrado neste trabalho, onde as maiores rebarbas foram obtidas para a menor taxa de avanço utilizada ($0,047\text{mm/rot}$).

A velocidade de corte teve pouca influência na formação de rebarbas, quando comparada ao avanço e o tipo de broca. Em seu estudo Abdelhafeez et al. (2015)

quando realizado a furação em alumínio também não encontrou grande influência da velocidade de corte na formação de rebarbas.

A partir dos resultados coletados, foi gerado um gráfico (figura 31) comparando as alturas médias e desvio padrão encontrados e os respectivos parâmetros de corte, afim de verificar quais combinações de fatores obtivemos as menores rebarbas.

Figura 31 – Altura da Rebarba – Tipo de Broca x Avanço (mm/rot) x Velocidade de Corte (m/min)



Fonte: o Autor (2018)

Conforme análise, a melhor combinação de parâmetros foi a utilização da broca tipo W, avanço de 0,15mm/rot e velocidade de corte de 100m/min. As variações do tipo de broca e avanço estão de acordo com os obtidos na ANOVA, onde a broca W e avanço médio são os fatores mais propícios a obter uma menor rebarba. As maiores rebarbas foram encontradas quando a utilização da broca tipo N foi aplicada.

4.3 Rugosidade

A medição da rugosidade foi realizada em dois pontos em cada furo distantes a 180°, totalizando dez medições por amostra. Após todas as medições, uma média

e um desvio padrão foi gerado para cada amostra, os resultados são apresentados na tabela 8.

Tabela 8 – Valor Médio da Rugosidade

nº Amostra	Média Ra (μm)	Desvio Padrão (mm)
1	6,156	2,324
2	4,610	1,634
3	6,517	2,098
4	5,805	2,134
5	4,769	1,820
6	4,709	0,753
7	7,949	1,898
8	5,198	1,854
9	5,738	1,228
10	6,353	1,206
11	5,54	1,209
12	6,746	1,823
13	13,047	5,737
14	3,861	1,642
15	2,525	1,134
16	4,928	2,741
17	4,981	2,338
18	3,692	1,612

Fonte: o Autor (2018)

Uma análise de variância com nível de confiança de 95% foi gerada a partir da coleta de dados da rugosidade, a fim de averiguar a importância dos três fatores avaliados na pesquisa (tipo de broca, avanço e velocidade de corte). A tabela 9 mostra os resultados obtidos.

Tabela 9 – Análise da Rugosidade – ANOVA

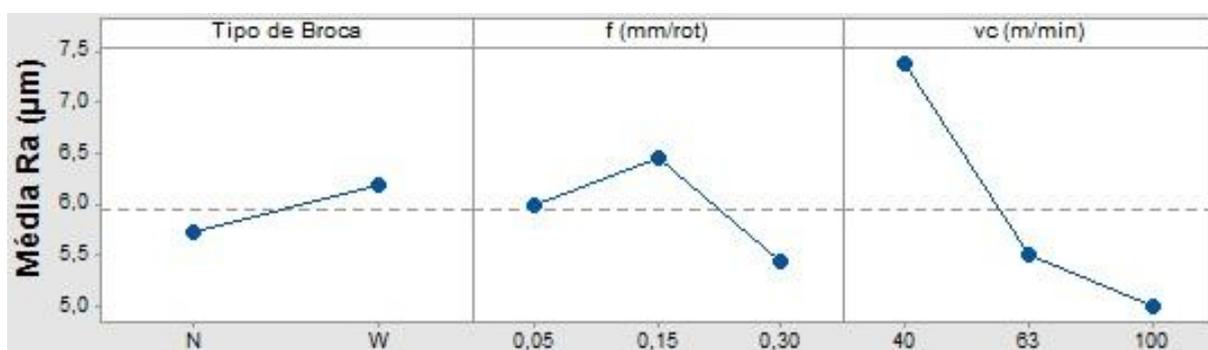
Fator de Variação	DF	SS	MS	F	P
Avanço	2	32,47	16,23	1,04	0,356
Velocidade de Corte	2	189,59	94,79	6,06	0,003
Broca	1	9,9	9,9	0,63	0,427
Erro	174	2720,2	15,63		
Total	179	2952,2			

Fonte: o Autor (2018)

Analisando os resultados da tabela 8 é possível verificar que os fatores avanço e tipo de broca obtiveram o valor “P” acima de 0,05, significando que, com essas evidências não há como afirmar que estes parâmetros influenciam na rugosidade. Em contrapartida, por obter o valor “P” abaixo de 0,05, é possível afirmar com 95% de confiabilidade que a velocidade de corte influencia diretamente no acabamento superficial.

Com os resultados da ANOVA, foi gerado um gráfico com a influência de cada fator (tipo de broca, avanço e velocidade de corte) na qualidade superficial das amostras, disposto na figura 32.

Figura 32 – Efeito dos Fatores na Rugosidade



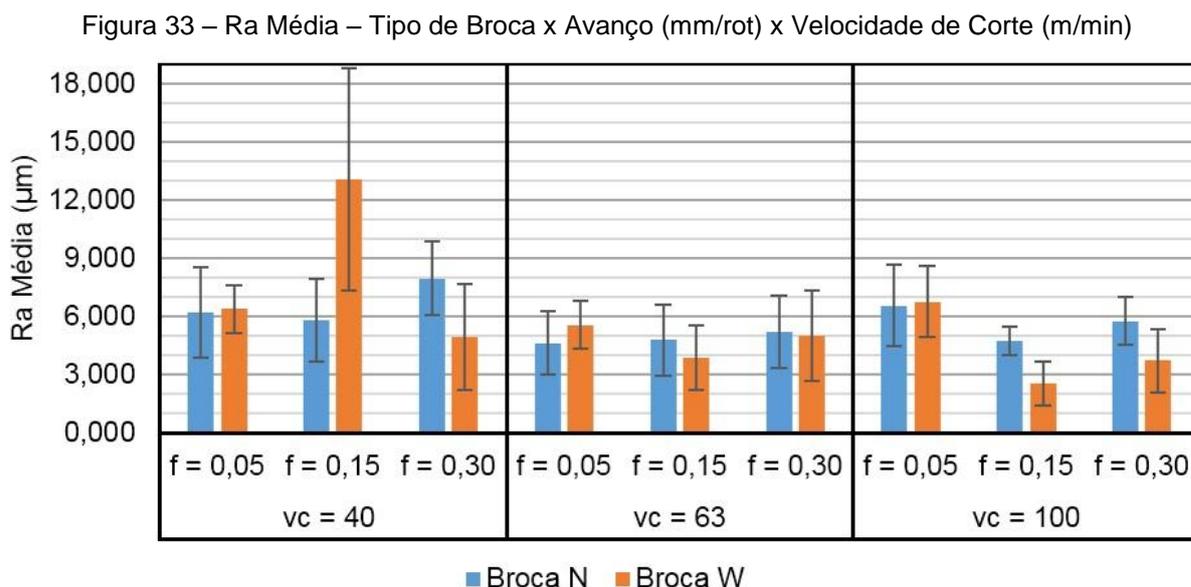
Fonte: o Autor (2018)

Analisando o gráfico é possível concluir que o fator que mais influência no acabamento superficial é a velocidade de corte, quanto maior, melhor o acabamento obtido. Visto que em velocidades baixas, os valores de rugosidade ficam muito elevados.

O tipo de broca e o avanço apresentam pouca relevância quando comparados a velocidade de corte. O tipo de broca N apresenta um melhor resultado comparado ao tipo W. Em seu estudo com a liga de alumínio 7075, Vieira et al. (2015) encontra os maiores valores de rugosidade quando utiliza brocas com afiação cruzada e ângulo de ponta de 130°, esses valores geram uma concordância com os resultados obtidos neste trabalho, pois a broca tipo W possui afiação cruzada e ângulo de ponta de 135°.

A melhor condição de rugosidade para o fator avanço foi utilizando a taxa de 0,30mm/rot, seguido da variação 0,05mm/rot. Estes resultados para o fator avanço são diferentes dos obtidos por Vieira et al. (2015), que utilizou as mesmas taxas de avanço aplicadas neste trabalho (0,05, 0,15 e 0,30mm/rot), e seus resultados mostram que conforme o avanço aumenta, os valores de rugosidade crescem na mesma proporção.

Um gráfico de comparação entre todas as médias de rugosidade e desvio padrão de cada amostra foi gerado (figura 33), para poder identificar quais combinações de fatores devemos utilizar para obter o menor valor de Ra.



Fonte: o Autor (2018)

Analisando a figura 33, pode-se observar que utilizando o fator velocidade de corte de 100m/min foram obtidos os dois menores valores de rugosidade, confirmando os dados obtidos na análise de variância.

4.4 Classificação dos Cavacos

Os cavacos foram classificados de acordo com o tipo formado. Foi utilizado o método aplicado pela Mitsubishi® (2018) para classifica-los, conforme a figura 16.

A tabela 10 mostra os tipos de cavacos encontrados em cada amostra. A figura 34 traz as amostras de cavaco coletadas para cada variação.

Como pode ser observado na tabela 9, o cavaco tipo agulha não foi encontrado em nenhuma amostra, isto porque, de acordo com Mitsubishi® (2018) este é um tipo predominante para materiais frágeis.

O tipo mais predominante foi o passo longo, que é encontrado em materiais maleáveis, como o alumínio. Em relação ao passo longo, notou-se diferentes espessuras do cavaco, onde a utilização do avanço de 0,30mm/rot apresentou os piores resultados, independentemente do tipo de broca.

O tipo espiral cônico, foi encontrado com maior volume nas amostras que a menor taxa de avanço foi aplicada (0,05mm/rot). Segundo Mitsubishi® (2018) este tipo de cavaco é comum quando baixas taxas de avanço são utilizadas, principalmente em materiais dúcteis.

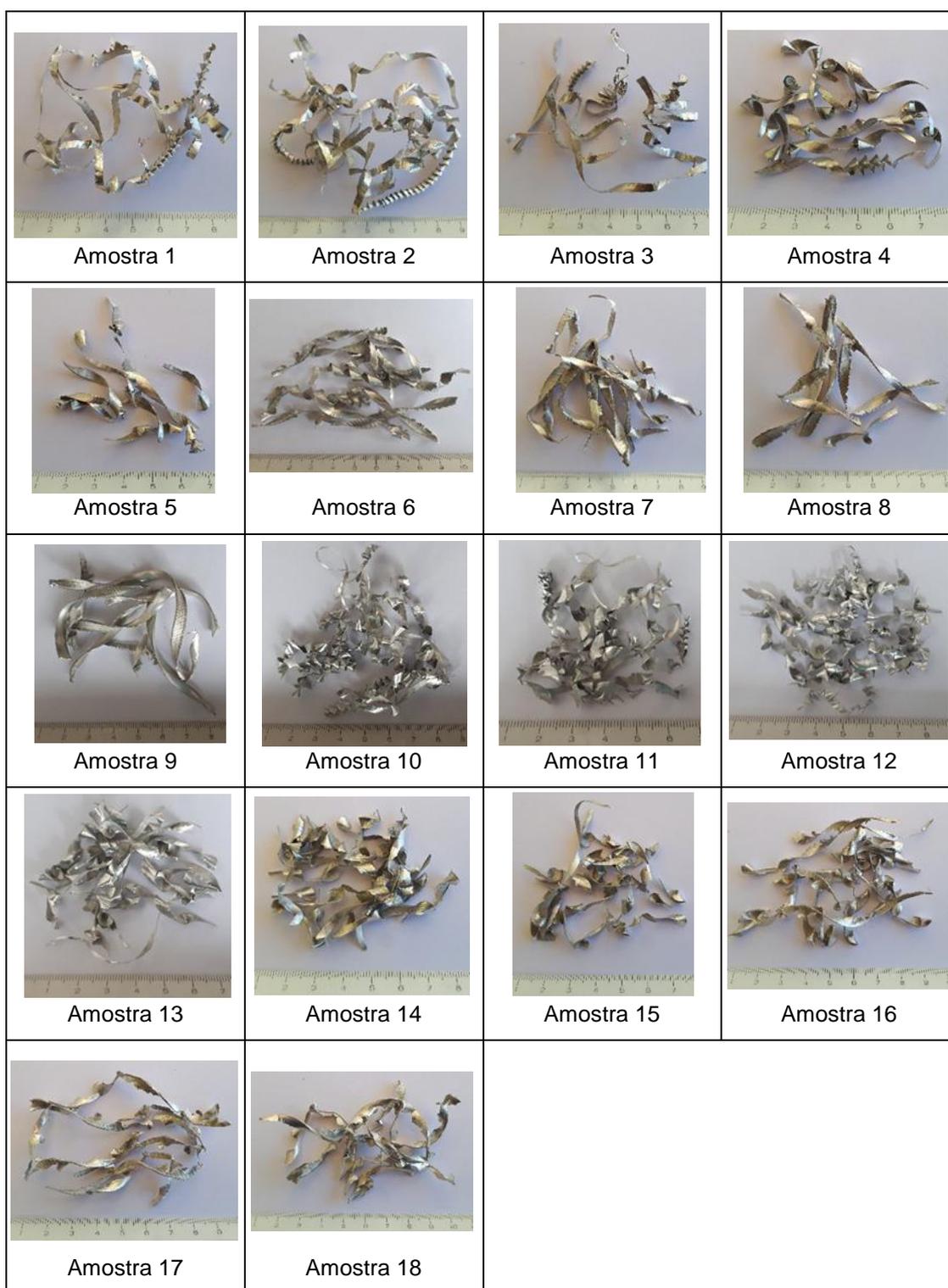
A melhor condição de cavaco obtida foi a da amostra 12 (broca tipo W, $f = 0,05\text{mm/rot}$ e $vc = 100\text{m/min}$), que apresentou boa formação e cavacos pequenos. A amostra 9 (broca tipo N, $f = 0,30\text{mm/rot}$ e $vc = 100\text{m/min}$) foi a condição que apresentou a pior condição, formando cavacos longos e espessos.

Tabela 10 – Tipos de Cavacos Encontrados

nº Amostra	Espiral Cônico	Passo Longo	Vírgula	Fragmento Cônico	Leque	Agulha	Predominante
1	X	X					Espiral Cônico; Passo Longo
2	X	X			X		Espiral Cônico; Passo Longo
3	X	X			X		Leque
4	X			X			Fragmento Cônico
5	X	X		X			Passo Longo; Fragmento Cônico
6	X	X		X			Passo Longo; Fragmento Cônico
7		X		X			Passo Longo
8		X		X			Passo Longo
9		X		X			Passo Longo
10	X	X		X			Espiral Cônico;
11	X	X	X	X			Passo Longo
12	X	X		X	X		Fragmento Cônico; Leque
13		X		X			Fragmento Cônico
14		X	X	X			Fragmento Cônico
15		X	X	X			Fragmento Cônico
16		X		X			Passo Longo
17		X		X			Passo Longo
18		X		X			Passo Longo

Fonte: o Autor (2018)

Figura 34 – Cavacos Encontrados em Cada Amostra (escala em centímetros)



Fonte: o Autor (2018)

5 CONCLUSÃO

Após a realização dos ensaios de furação da liga de alumínio 6063 T5, e análise dos resultados, pode-se concluir que:

- a) A broca tipo W mostrou-se mais eficiente que a broca N quando observados o tipo e a altura da rebarba;
- b) Os maiores valores na altura da rebarba foram obtidos quando utilizado o maior avanço (0,30mm/rot) independentemente do tipo de broca e velocidade de corte, confirmando a tendência relatada na literatura;
- c) Utilizando a velocidade de corte de 100m/min, foram obtidos os melhores valores de rugosidade. Assim, conclui-se com 95% de confiabilidade, conforme ANOVA, que existe uma tendência de melhoria da rugosidade com aumento da velocidade de corte na furação;
- d) A menor rebarba encontrada foi no experimento onde foi utilizado a broca tipo W, avanço de 0,15mm/rot e velocidade de 100m/min;
- e) O menor valor de rugosidade foi encontrado quando combinado a broca tipo W, avanço de 0,15mm/rot e velocidade de corte de 100m/min;
- f) A melhor condição de cavaco obtida foi utilizando a broca tipo W, avanço de 0,05mm/rot e velocidade de corte de 100m/min.

Após análise dos resultados, uma faixa de parâmetros é recomendada para obter-se uma menor rebarba para a furação da liga de alumínio 6063 T5:

- a) Para obter uma menor rebarba utilizando a broca tipo N, recomenda-se utilizar o avanço de 0,15mm/rot e velocidade de corte de 40 a 63m/min;
- b) Para obter uma menor rebarba utilizando a broca tipo W, recomenda-se utilizar o avanço de 0,15mm/rot e velocidade de corte de 63 a 100m/min.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Replicar os dados do experimento, porém ao invés de utilizar a broca tipo W, utilizar apenas a tipo N com alterações no ângulo de ponta.

Realizar uma análise não apenas das rebarbas de saída, mas também nas de entrada.

Aumentar a quantidade de furo por amostra a fim de avaliar os tipos de desgastes sofridos pela ferramenta e avaliar seus efeitos na formação de rebarbas.

Avaliar não apenas a qualidade superficial dos furos, mas também a qualidade de forma e posicionamento.

Comparar a formação de rebarbas em diferentes ligas de alumínio.

Verificar o processo de furação em materiais mais finos, onde a formação de rebarbas é maior.

Realizar estudo com mais de um diâmetro de broca, a fim de averiguar sua importância na formação de rebarbas.

Estudar o efeito do avanço no processo de furação com furos passantes, aplicando uma taxa elevada e diminuir pouco antes da ruptura do material, a fim de verificar a formação de rebarbas.

REFERÊNCIAS

ABDELHAFEEZ, A.m. et al. Burr Formation and Hole Quality When Drilling Titanium and Aluminium Alloys. **ScienceDirect**. Birmingham, UK, p. 230-235. 2015.

AURICH, J.C. et al. Burrs—Analysis, Control and Removal. **Cirp Annals - Manufacturing Technology**. Germany, p. 519-542. 2009.

CASTILLO, Willian Jefferson González. **Furação Profunda de Ferro Fundido Cinzento GG25 com Brocas de Metal-duro com Canais Retos**. 2005. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2005.

CAVALCANTE, Fabrício José Nóbrega. **Análise de Utilização de Broca Escalonada de Canal Reto no Processo de Furação em uma Liga de Alumínio Utilizada na Indústria Automotiva**. 2010. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2010.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 8. ed. São Paulo: Artliber, 2013. 270 p.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da Usinagem dos Materiais**. 5. ed. São Paulo: Blucher, 1970. 751 p.

FERREIRA, Bruna Torres et al. Análise da Formação de Rebarbas e do Encruamento dos Perfis de Rosca no Processo de Roscamento por Conformação da Liga de Alumínio 7075. **8º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, Salvador, BA. 2015.

FISCHER, Ulrich et al. **Manual de Tecnologia Metal Mecânica**. São Paulo: Blucher, 2008. 412 p.

FRANKE, V.; LEITZ, L.; AURICH, J.C. Burr Measurement: A Round Robin Test Comparing Different Methods. **Proceedings of the CIRP International Conference on Burrs**. Germany, p. 167-178. 2009.

GILLESPIE, Laroux K. **Deburring and Edge Finishing Handbook**. Michigan: Society of Manufacturing Engineers, 1999. 405 p.

GONÇALVES, Ricardo Augusto; SILVA, Márcio Bacci da; COSTA, Éder Silva. Análise da Formação de Cavacos e Rebarbas e Alterações Subsuperficiais na Furação da Liga de Alumínio 6351 com Diferentes Adições de Cobre. **9º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, Joinville, SC. 2017.

GUIMARÃES, Vagner Alves. **Controle Dimensional e Geométrico: Uma Introdução à Metrologia Industrial**. Passo Fundo: UPF, 1999. 161p.

KILICKAP, Erol. Modeling and Optimization of Burr Height in Drilling of Al-7075 Using Taguchi Method and Response Surface Methodology. **Int J Adv Manuf Technol**. London, UK, p. 911-923. 2010.

KIM, Jinsoo; MIN, Sangkee; DORNFELD, David A. Optimization and Control of Drilling Burr Formation of AISI 304L and AISI 4118 Based on Drilling Burr Control Charts. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. Berkeley, CA, USA, p. 923-936. 2001.

KO, Sung-lim; CHANG, Jae-eun; YANG, Gyun-eui. Burr Minimizing Scheme in Drilling. **Journal of Materials Processing Technology**. Seoul, South Korea, p. 237-242. 2003.

KO, Sung-lim; LEE, Jing-koo. Analysis of Burr Formation in Drilling With a New-Concept Drill. **Journal of Materials Processing Technology**. Seoul, South Korea, p. 392-398. 2001.

LAUDERBAUGH, L. Ken. Analysis of the Effects of Process Parameters on Exit Burrs in Drilling Using a Combined Simulation. **Journal of Materials Processing Technology**. Colorado Springs, USA, p. 1909-1919. 2009.

MACHADO, Álisson Rocha et al. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2011. 397 p.

MARTINS, Paulo Sérgio. **Avaliação dos Sistemas de Fixação Hidráulico e Térmico de Broca de Metal Duro em Furação do Cabeçote do Motor Fire**. 2008. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

MELLO, Máquinas e Equipamentos. **Retificação e Afição**. São Paulo: Mello, 2001. 323 p.

MIN, Sangkee; DORNFELD, David A.; NAKAO, Yohichi. Influence of Exit Surface Angle on Drilling Burr Formation. **J. Manufacturing Science and Engineering**, California, USA, p.637-644. 2003.

MITSUBISHI. **Termologia das Brocas e Características de Usinagem**. Disponível em:

<http://www.mitsubishicarbide.com/application/files/5914/8178/7915/tec_drilling_terminology_pt-br.pdf>. Acesso em: 29 abr. 2018.

NIKNAM, Seyed Ali. **Burrs Understanding, Modeling and Optimization During Slot Milling of Aluminium Alloys**. 2013. 209 f. Tese (Ph.D) - École de Technologie Supérieure Université Du Québec, Montreal, Canada. 2013.

SANTOS, Sandro Cardoso; SALES, Wisley Falco. **Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Materiais**. São Paulo: Artliber, 2007. 246 p.

SANTOS, Sandro C.; SILVA, Márcio B. da. O Processo de Furação Diante das Tendências de Evolução dos Processos de Usinagem. **1º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, Curitiba, PR. 2001.

SHIKATA, H. An Experimental Investigation of Sheet Metal Drilling. **Annals of The CIRP**. UK, p. 85-88. 1980.

SKF, Ferramentas S.A. **Manual Técnico SKF**. 2. ed. São Paulo: SKF Ferramentas, 1989. 261 p.

SOARES FILHO, Martiliano. **Estudo da Formação de Rebarbas no Processo de Furação**. 1995. 159 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 1995.

STEMMER, Caspar Erich. **Ferramentas de Corte I**. 7. ed. Florianópolis: UFSC, 2007. 249 p.

STEMMER, Caspar Erich. **Ferramentas de Corte II: Brocas, Alargadores, Ferramentas de Roscar, Fresas, Brochas, Rebolos, Abrasivos**. 3. ed. Florianópolis: UFSC, 2005. 314 p.

VIEIRA, Jéssica Tito et al. Influência da Afiação de Brocas HSS no Processo de Furação da Liga de Alumínio 7075. **8º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, Salvador, BA. 2015.

WEINGAERTNER, Walter Lindolfo; SCHROETER, Rolf Bertrand. **Tecnologia de Usinagem do Alumínio e Suas Ligas**. São Paulo: Alcan Alumínio do Brasil, 1990. 73 p.

ANEXOS

Anexo A – Certificado de Qualidade Alumínio 6063 T5

V.01.00

SHOCK METAIS NÃO FERROSOS LTDA
2065-1611 / 2500-2500 CERTIFICADO DE QUALIDADE - 000182780/01

Produto : ABR49060000254001270K - AL B.RETANG. 6063 T5 25,40 X 12,70MM - 10
 Cliente : 009407737/0001 - PALMAX METAL DISTRIBUIDORA EIRELI
 Emissao : 06/02/2017
 Num. Docto. : 000182780
 Lote : 030130.0005393.1
 No do Pedido : 083192
 Controle interno : SK0C2D
 Tam. Lote : 21,00 KG
 Norma tecnic :

LABORATORIO : LABMEC

Ensaio	Metodo	Unid.Medi	Especificado		Encontrado
			Minimo	Maximo	
Alongamento		%	8,000	>>>	23,320
Limite Escoamento		MPa	110,000	>>>	206,620
Limite Resistencia		MPa	150,000	>>>	232,810

LABORATORIO : LABQUI

Ensaio	Metodo	Unid.Medi	Especificado		Encontrado
			Minimo	Maximo	
Al		RESTANTE			RESTANTE
Cr		%	<<<	0,100	0,010
Cu		%	<<<	0,100	0,010
Fe		%	<<<	0,350	0,220
Mg		%	0,450	0,900	0,490
Mn		%	<<<	0,100	0,020
Outros		%	<<<	0,150	0,000
Si		%	0,200	0,600	0,480
Ti		%	<<<	0,100	0,020
Zn		%	<<<	0,100	0,000

Laudos.....: APROVADO SEM RESTRICOES ***
 Data Laudo.....: 24/10/2016

Qtde. Rej.....: 0 QUILOGRAM

Emitido por: Depto.Qualidade - Data: 06/02/2017