

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DO TORNEAMENTO ORTOGONAL DAS LIGAS DE ALUMÍNIO AISI 6262-T6 E
AISI 6351-T6

por

Braian Dela Nora Trelha

-

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Julho de 2017.



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

ESTUDO DO TORNEAMENTO ORTOGONAL DAS LIGAS DE ALUMÍNIO AISI 6262-T6 E
AISI 6351-T6

por

Braian Dela Nora Trelha

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof^a. Thamy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Dr. Heraldo Amorim

Comissão de Avaliação:

Prof. André João de Souza

Prof. Darci Barnech Campani

Prof. Patric Daniel Neis

Porto Alegre, 21 de Julho de 2017.

*"Smile. Listen. Agree. And
then do whatever the fuck you wanted to do anyway".*

Robert Downey Jr.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Neusa Dela Nora Trelha e Ivon de Mello Trelha, por terem me dado todo o apoio e suporte necessário para conseguir concluir esta etapa extremamente importante da minha vida, sobretudo no que diz respeito a dinheiro, carinho e apoio emocional.

Agradeço ao meu irmão e primo, Clinte Dela Nora Trelha e Cassiano Dalla Nora Martins por terem me apoiado na chegada à Porto Alegre e sempre me aconselhado a seguir em frente, pois seria uma longa jornada de estudos.

Agradeço a todos meus familiares por todo apoio psicológico e emocional, por terem me tirado às vezes desse meio estudantil e me lembrarem de que as principais alegrias estão nas coisas mais simples da vida.

Agradeço a minha namorada, Aline Nunes Dotto e Tibico, por terem me apoiado sempre nos momentos felizes e difíceis do curso, e me motivado para continuar seguindo para chegar neste momento atual.

Também agradeço aos meus amigos, que sempre estiveram presentes nessa jornada, me dando motivação e alegria para não desistir.

Agradeço aos Professores Heraldo Amorim e André João de Souza na orientação do meu trabalho de conclusão de curso e também da ajuda inigualável de Guilherme Vargas por toda ajuda suporte e atenção disponibilizados para implementação dos experimentos.

Agradeço também à empresa Galeazi Metais pela doação dos materiais utilizados para realizar este trabalho. Em especial, agradeço aos Srs. Luiz Carlos Camargo e Jorge Carvalho pela atenção dispensada.

Agradeço ao Adílio Felipe pela doação das ferramentas de corte utilizadas para realizar este trabalho e à Eduardo Brezolin e Pedro Montanari, bolsistas, por auxiliarem no estudo dos resultados.

Agradeço ao laboratório LAMEF por contribuir para o avanço do trabalho fazendo a medição de dureza.

Agradeço ao Professor Gilberto Cunha do Laboratório de Usinagem (LUC) que liberou o torno para os experimentos e ao professor Rodrigo Rossi por deixar à disposição a câmera de alta velocidade.

Aos professores da Engenharia Mecânica, pela dedicação e excelência na hora de transmitir os conhecimentos necessários para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico, bem como os ensinamentos de vida e suas experiências, para que nos tornemos ótimos profissionais.

Por fim, mas não menos importante, à Universidade Federal do Rio Grande do Sul, por proporcionar um ensino gratuito de altíssima qualidade e infraestrutura necessária para que esse título fosse alcançado.

DELA NORA TRELHA, B. **Estudo do Torneamento Ortogonal das Ligas de Alumínio AISI 6262-T6 e AISI 6351-T6**. 2017. 15f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

RESUMO

Este trabalho consiste no estudo do torneamento ortogonal de ligas de alumínio, desenvolvido a partir da realização de um projeto de experimentos 2^k com três fatores. Foram avaliados em dois níveis os efeitos da liga de alumínio (AISI 6262-T6 e AISI 6351-T6) e dos parâmetros de processo (avanço e velocidade de corte) sobre as componentes ativas da força de usinagem e sobre o grau de recalque sofrido pelo material durante o corte. Os resultados obtidos se mostraram de acordo com o observado na literatura, com o material apresentando maior influência sobre as duas componentes ativas da força de usinagem. Para um nível de significância de 5%, observou-se influência significativa do material e do avanço sobre a força de corte, e da velocidade de corte (v_c) para um nível de significância de 10%. Tanto o material quanto a velocidade de corte apresentaram influência significativa sobre a força de avanço (F_f). Somente o material mostrou influência significativa sobre o grau de recalque. Na avaliação das imagens obtidas pela câmera de alta velocidade, foi possível entender a formação de cavaco e permitir os cálculos dos valores de grau de recalque (R_c), que apresentaram resultados próximos aos obtidos através da medição da espessura dos cavacos. A avaliação das ferramentas de corte se mostrou de acordo com a literatura, com maior deposição de material observada na usinagem da liga mais dúctil (AISI 6351-T6) e a baixas velocidades de corte.

PALAVRAS-CHAVE: (avanço, velocidade de corte, grau de recalque).

DELA NORA TRELHA, B. **Study of Orthogonal Turning of the AISI 6262-T6 and AISI 6351-T6 Aluminum Alloys**. 2017. 15p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

ABSTRACT

In this work, the study of orthogonal turning of aluminum alloys was approached through a three factor 2^k design of experiment. The influence of selected aluminum alloy (AISI 6262-T6 and AISI 6351-T6) and process parameters (cutting speed and feed rate) over the active components of the machining force and chip thickness ratio were evaluated in two levels. Results showed good agreement with literature, with machined material as the most influent parameter for active components of machining force. For a 5% significance level, material and feed rate showed significant influence over cutting force (F_c), with significant influence of v_c when $\alpha = 10\%$. Both machined material and v_c presented significant influence over feed force. Only material showed significant influence over chip thickness ratio. Images captured with the high speed camera aided understanding of the chip formation and allowed the calculations of R_c with good agreement when compared to results obtained through measurement of chip thickness. Evaluation of tools showed good agreement with theoretical behavior, with larger material deposition during machining of the ductile alloy (AISI 6351-T6) and at lower cutting speeds.

KEYWORDS: (advance, cutting speed, chip thickness ratio).

ÌNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
2.1 Torneamento.....	1
2.2 Formação do cavaco.....	2
3. MATERIAIS E MÉTODOS	5
3.1 Ferramenta de corte.....	5
3.2 Corpos de prova.....	6
3.3 Parâmetros de corte.....	7
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	7
4.1 Força de corte.....	7
4.2 Força de avanço	8
4.3 Grau de Recalque	9
4.4 Estado das ferramentas de corte.....	10
4.5 Cavacos gerados	12
5. CONCLUSÕES	13
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14
APÊNDICE.....	16

1. INTRODUÇÃO

Processos de fabricação por usinagem são caracterizados pela remoção de material. Estes processos possuem grande importância econômica, representando mais de 15% do valor total de todos os produtos industrializados (Merchant, 1998).

Com o intuito de reduzir custos de fabricação e aumentar a produtividade dos processos de usinagem, grande esforço é despendido visando o desenvolvimento de máquinas operatrizes e ferramentas de corte. Contudo, as características referentes às superfícies e tolerâncias ainda assim podem não ser atingidas durante o processo de usinagem. A maneira como o cavaco é formado influencia as tensões residuais na superfície usinada, as forças de corte e as temperaturas desenvolvidas durante a usinagem (Ng e Aspinwall, 2002), além de afetar a vida da ferramenta de corte (Pantale et al., 2004). A ocorrência simultânea de diferentes fenômenos físicos de origem térmica e mecânica durante o processo de usinagem faz com que a escolha dos parâmetros de corte seja complexa. As propriedades do material usinado e sua condição, bem como o material e geometria da ferramenta de corte também alteram de forma significativa o resultado final de remoção de cavaco (Belhadi et al., 2005).

Devido à sua gama variada de propriedades, entre as quais se destaca a sua elevada relação resistência/ peso, o alumínio é um dos materiais mais utilizados na fabricação de peças nas indústrias automobilística e aeronáutica, ficando atrás somente do ferro (Figueiredo, 2000). A utilização de ligas de alumínio pela indústria automotiva tem aumentado devido ao crescente interesse por veículos leves e econômicos (Smerd et al, 2005), crescendo mais de 80% entre 1995 e 2000 (Miller et al., 2000). A grande variedade de ligas e tratamentos térmicos em que o alumínio pode ser fornecido faz necessário um estudo criterioso de seleção de material.

O objetivo deste trabalho é avaliar experimentalmente os elementos envolvidos na formação do cavaco no torneamento ortogonal de alumínio. Para tanto, foram avaliadas as influências do avanço e da velocidade de corte sobre características de usinabilidade das ligas AISI 6262-T6 e AISI 6351-T6. As variáveis de saída avaliadas foram as componentes ativas da força de usinagem (força de corte e força de avanço), medidas com um dinamômetro piezométrico para uso em usinagem, e o grau de recalque, com auxílio de uma câmera de alta velocidade.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Torneamento

Segundo a norma ABNT NBR 6175, 2015, torneamento é um processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes.

Os principais parâmetros de processo no torneamento são a velocidade de corte (v_c), a profundidade de corte (a_p) e o avanço (f). A velocidade de corte é a taxa na qual a superfície a ser usinada passa pela aresta de corte da ferramenta. A profundidade de corte é a largura de penetração da ferramenta medida numa direção perpendicular ao plano de trabalho. Por fim, o avanço corresponde ao deslocamento sofrido pela ferramenta na direção de avanço em uma revolução da peça. Adicionalmente, a largura de usinagem (b) e a espessura de corte (t) auxiliam no cálculo da força de corte, com a primeira correspondendo à largura da seção transversal de corte, idêntica ao comprimento efetivo da aresta de corte, e a segunda à espessura da seção transversal de corte.

Visando a redução do tempo de usinagem, a velocidade de corte deve ser tão alta quanto possível tecnicamente e viável economicamente. Dependendo do tipo e dureza da peça usinada é necessário selecionar uma classe de ferramenta de corte adequada à velocidade de corte. Em ligas de alumínio com ferramenta de aço rápido, por exemplo, velocidades acima de 60 m/min diminuem o risco de deposição de material na ferramenta de corte, facilitam a quebra do cavaco e diminuem a deformação plástica na região de corte e o trabalho específico de

corte, além de resultar em melhor acabamento dos componentes produzidos (Weingaertner e Schröeter, 1990). Usinagens em baixas velocidades de corte (20-40 m/min) tendem a causar trepidação, podendo também contribuir com a diminuição da vida da ferramenta (Mitsubishi Materials, 2017). A velocidade de corte está fortemente relacionada à geração de calor: seu aumento causa a elevação das temperaturas durante a usinagem, podendo resultar na redução da vida da ferramenta. Por outro lado, o aumento da temperatura pode facilitar a usinagem em alguns casos devido à redução da resistência ao cisalhamento do material.

Um método bastante utilizado para o estudo do processo de formação do cavaco é o corte ortogonal (Figura 2.1). Nesta variação do processo de torneamento, a aresta cortante é posicionada de forma ortogonal em relação ao plano de trabalho, de modo que a formação do cavaco pode ser considerada um fenômeno bidimensional (ABNT NBR 6162, 1989).

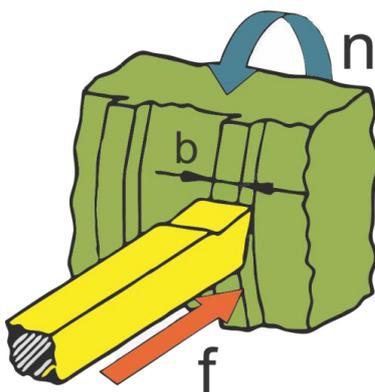


Figura 2.1 Exemplo de corte ortogonal (Adaptado de Machado, 2009).

As ferramentas de corte utilizadas em processos de torneamento são ferramentas monocortantes (Boothroyd, 1981) cujas especificações dependem, principalmente, dos ângulos de saída (γ_o) e de folga (α_o) (Roy et al., 2009; Tang et al., 2009). O ângulo de saída (γ_o) afeta significativamente as características de usinabilidade, em especial as associadas à força de usinagem, enquanto o ângulo de folga (α_o), que determina a folga entre a ferramenta e a superfície usinada, influi na penetração da ferramenta na peça, minimiza o atrito ferramenta-peça e altera as características de resistência mecânica da cunha de corte (β_o). Apesar de o ângulo de folga (α_o) não participar do escorregamento do cavaco diretamente, como acontece com o ângulo de saída (γ_o), ele pode afetar o desgaste de flanco (Boothroyd, 1981).

2.2 Formação do cavaco

Entende-se por cavaco a porção de material da peça retirada pela ferramenta, caracterizando-se por apresentar uma forma geométrica irregular (Ferraresi, 1977). Diversas variáveis podem influenciar a natureza e a extensão da fratura que ocorre durante o processo de formação de cavaco. Segundo Shaw, 1986, as propriedades do material e a geometria da ferramenta são os principais elementos envolvidos na formação do cavaco. A Figura 2.2 apresenta o ciclo de formação do cavaco. A quantidade de material removido na direção do avanço (t) tem valor igual ao avanço (f) no corte ortogonal. A espessura do cavaco é dada por (td) e o ângulo de cisalhamento (θ) indica o grau de deformação ao longo do plano de cisalhamento primário (PCP). Segundo Trent e Wright (2000), esse ângulo é responsável pelo acabamento da superfície usinada, pelas tensões sobre a ferramenta de corte, pela força de usinagem, pela temperatura de corte e pela energia consumida no processo. Conforme o elemento de volume $klmn$ se aproxima da aresta de corte com uma velocidade de corte (vc) ele sofre deformação elástica contra a superfície de saída até que o regime elástico é excedido e o material se deforma plasticamente. A deformação plástica ocorre na zona de cisalhamento primária, representada de forma simplificada pelo plano de cisalhamento od . Em o , inicia a trinca, orientada segundo o plano od . O elemento $qprs$ representa a porção $klmn$ totalmente deformada plasticamente na forma de lamelas deslizando sobre a superfície de saída. Assim, o

ângulo de cisalhamento (ϕ) é o ângulo entre o plano de trabalho e o plano de cisalhamento (od). A velocidade do cavaco sobre a superfície de saída da ferramenta é assumida para variar tangencialmente no meio da linha da espessura do cavaco (td) e com intensidade constante (Hond e Ding, 2001). Ângulos de saída negativos ou arredondamentos na ponta da ferramenta aumentam a deformação plástica durante a formação de cavaco (Klose, 1993).

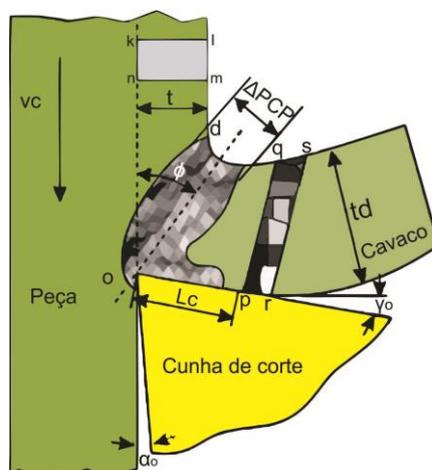


Figura 2.2 Ciclo de formação do cavaco (Adaptado de Santos Jr., 2012).

O grau de recalque (Rc) apresenta uma informação valiosa a respeito da deformação sofrida pelo material na zona de cisalhamento, e pode ser calculado através da espessura do cavaco deformado (td) e do cavaco indeformado (t) ou das velocidades antes (vc) e depois do corte ($vcav$), como ilustra a Eq.2.1.

$$Rc = \frac{td}{t} = \frac{vc}{vcav} \quad (2.1)$$

O ângulo de cisalhamento (ϕ) pode ser calculado em função de γ_o (Eq.2.3):

$$tg\phi = \frac{cos\gamma_o}{Rc - sen\gamma_o} \quad (2.2)$$

A força necessária para formar o cavaco é dependente da resistência ao cisalhamento do material da peça, das condições de usinagem e da área do plano de cisalhamento. O conhecimento das forças de usinagem permite estimar a potência necessária para o corte do material, além de ser um parâmetro importante para o desenvolvimento de máquinas operatrizes de rigidez adequada. A força de usinagem (F_u) no corte ortogonal pode ser representada pela força de corte (F_c), medida na direção de corte e pela força de avanço (F_f), medida na direção de avanço (normal à direção de corte), como ilustra a Figura 2.3(a). Conforme o material se aproxima da aresta de corte ele é deformado plasticamente através de uma força de cisalhamento (F_s) em uma região chamada plano de cisalhamento, cuja direção é dada pelo ângulo de cisalhamento (ϕ). A soma da força de cisalhamento com uma componente normal chamada força normal ao cisalhamento (F_sN) também resulta em F_u , como ilustra a Figura 2.3(b). As forças que atuam na superfície de saída da ferramenta, Figura 2.3(c), são representadas pela força de atrito (F_{at}), paralela à direção de escoamento do cavaco, e uma força normal ao atrito (F_{atN}). O ângulo ρ é chamado ângulo de fricção, e representa a relação geométrica entre as duas componentes de força.

A formação do cavaco influencia diversos fatores ligados à usinagem, tais como o desgaste da ferramenta, os esforços de corte, o calor gerado na usinagem. Assim, estão envolvidos com o processo de formação do cavaco, com aspectos econômicos e de qualidade da peça, com a segurança do operador e com a utilização adequada da máquina-ferramenta (Souza, 2011).

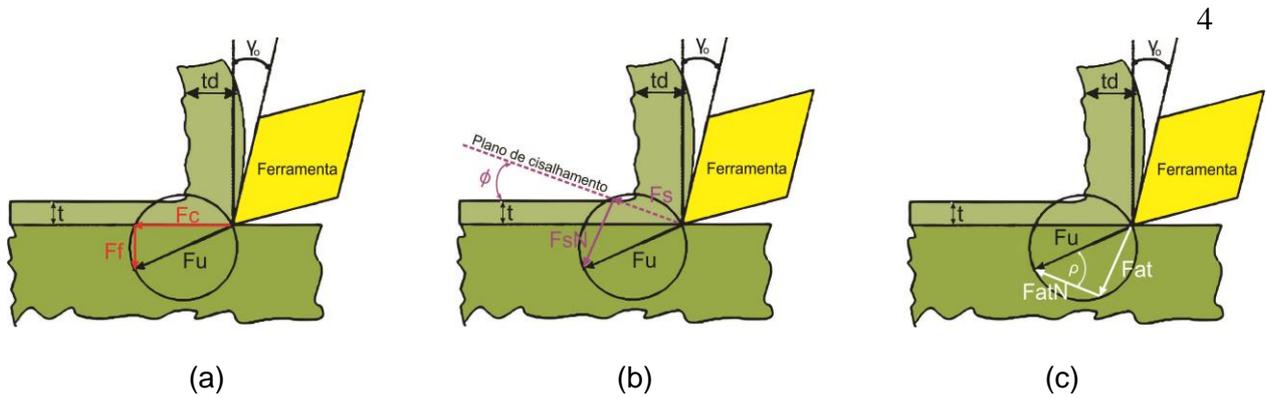


Figura 2.3 (a) Diagrama de forças para F_c e F_f ; (b) Diagrama de forças na zona de cisalhamento (c) Diagrama de forças (atrito) (Adaptado de Merchant, 1945).

As relações entre as componentes de força são possíveis de ser analisadas utilizando-se das razões geométricas estabelecidas no Circulo de Merchant (1945).

A Eq.2.3 permite o cálculo da força de cisalhamento que, por sua vez, pode ser usada para estimar a força de usinagem (Eq.2.4) e sua componente na direção de corte (Eq.2.5):

$$F_s = \sigma_s \cdot \frac{A}{\sin \phi} \quad (2.3)$$

Onde:

σ_s = Tensão média de cisalhamento;
 A = Área da seção transversal de corte.

$$F_u = \frac{F_s}{\cos(\phi + \rho - \gamma_0)} \quad (2.4)$$

$$F_c = F_u \cdot \cos(\rho - \gamma_0) \quad (2.5)$$

Diversos estudos buscaram relações que permitissem a determinação da força de corte no torneamento sem a necessidade de realizar medições de força. Parte significativa dos trabalhos se baseia na definição de uma pressão específica de corte K_s que, ao atuar sobre a área da seção de corte, definida pela largura e pelo comprimento de corte, resulta na força de corte (Eq.2.6). A equação mais utilizada para a determinação de K_s foi desenvolvida por Kienzle, 1951 (Eq.2.7). O valor de K_s é calculado em função da espessura de corte (t), e das constantes ks_1 e z , determinadas pelo material. No torneamento ortogonal, a largura de corte (t) é igual ao avanço (f).

$$K_s = \frac{F_c}{A} \quad (2.6)$$

$$K_s = \frac{K_{s1}}{h^z} \quad (2.7)$$

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Visando reduzir o número de variáveis no processo de corte optou-se por utilizar torneamento ortogonal, durante o qual foram medidas as componentes da força de corte. Para isso, foi usado um dinamômetro piezelétrico Kistler Instrument AG modelo 9272 com um condicionador de sinais da mesma marca, modelo 5070A. A placa de aquisição utilizada foi da National Instruments, modelo PCIM-DAS-1602/16 e software LabVIEW™ 8.6 com VI (Virtual Instrument), desenvolvida pelo LAUS (Laboratório de Automação em Usinagem).

Os sinais de força foram adquiridos usando um tempo de aquisição de 10 segundos e taxa de aquisição de 1000 pontos/segundo. Devido ao posicionamento do dinamômetro, utilizou-se uma orientação onde a direção de corte foi alinhada ao eixo Y e a força de avanço ao eixo Z.

A formação do cavaco foi avaliada através do uso de uma câmera de alta velocidade Phantom v.411 com lente AF-S VR Micro-Nikkor 105 mm f/2.8G IF-ED. A resolução utilizada foi de 640x480, com uma taxa de aquisição de 5000 quadros/s e exposição de 190 μ s. Devido às dimensões da câmera e aos requisitos de iluminação necessários para sua operação, os testes foram realizados em um torno convencional ROMI I-20, sem proteção externa. A Figura 3.1 apresenta a montagem dos equipamentos. Antes de cada teste, foi feita uma calibração da câmera próximo à região a ser usinada. Após isso foram feitas duas repetições para cada parâmetro de corte, com uma calibração da câmera para cada um dos mesmos.

Ao fim dos experimentos, todas as ferramentas foram fotografadas com um microscópio modelo Dino-Lite AM-413ZT para observar a ocorrência de adesão de material. Também foram avaliados os cavacos gerados com cada combinação de parâmetros de processo.



Figura 3.1 Montagem dos equipamentos.

3.1 Ferramenta de corte

Como o objetivo do trabalho não é avaliar o comportamento de vida da ferramenta de corte e sim a resposta do material durante a usinagem, força e deformação, optou-se por utilizar ferramenta de aço rápido, cuja afiação permite melhor controle sobre a geometria. Visando grandes deformações do material antes do corte, optou-se por ângulo de saída (γ_0) de 5°. Geometria semelhante foi utilizada por Vernaza-Peña et al., 2002, na usinagem da liga de alumínio AISI 6061-T6. As ferramentas de corte utilizadas neste estudo foram confeccionadas a partir de barras de aço rápido M2 com 10% de cobalto e afiadas em uma afiadora universal com ângulo de folga (α_0) igual a 6° (Figura 3.2). As arestas das ferramentas foram utilizadas em dois pontos diferentes, um para cada parâmetro de corte, garantindo a realização de todos os testes em arestas de características equivalentes e sem desgaste.

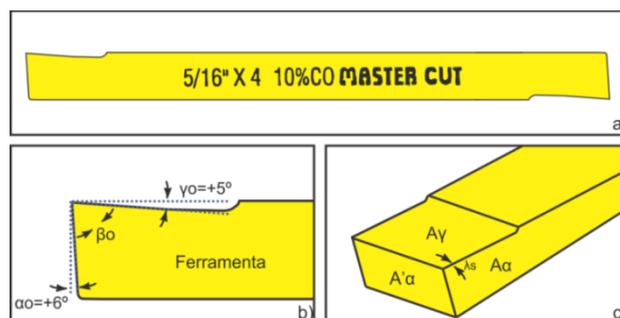


Figura 3.2 a) Ferramenta de aço rápido; b) Ângulos de saída e de folga; c) Principais superfícies.

3.2 Corpos de prova

Neste estudo foram avaliadas as ligas de alumínio AISI 6262-T6 e AISI 6351-T6, cujas composições químicas são apresentadas na Tabela 3.1. A dureza dos materiais avaliados foi medida no Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF/UFRGS) com um durômetro Emco-Test DuraVision G5, resultando em 86,08 HB para a liga AISI 6351-T6 e 102,80 HB para a liga AISI 6262-T6.

Ligas de alumínio da série 6XXX indicam que os principais elementos de liga são Magnésio (Mg) e o Silício (Si), os quais conferem maior resistência. O segundo dígito apenas indica alguma alteração de elemento de liga e o terceiro e quarto dígitos mostram somente diferentes ligas do mesmo grupo. A sigla T aponta tratamento térmico e o número 6 designa que a liga foi solubilizada e envelhecida artificialmente.

Tabela 3.1 Tabela de elementos de liga para os materiais estudados.

Liga	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Outros	Total	HB
AISI 6262-T6	0,4-0,8	0,7	0,15-0,4	0,15	0,8-1,2	0,04-0,14	0,3	0,15	0,05	0,15	102,8
AISI 6351-T6	0,7-1,3	0,5	0,1	0,4-0,8	0,4-0,8	-	0,2	0,2	0,05	0,15	86,08

Os corpos de prova foram usinados em barras de alumínio com diâmetro inicial de 75 mm. Para a confecção dos mesmos, utilizou-se o torno ROMI I-20 para realizar desbaste, rebaixo, furo de centro, e faceamento. Foram usinados onze canais de 55 mm de diâmetro com espaçamento de 4,5 mm e dez anéis de 69 mm de diâmetro e 2,5 mm de espessura, como ilustra a Figura 3.3. Para reduzir efeitos de desbalanceamento, cada corpo de prova recebeu o passe de acabamento no próprio torno utilizado para a realização dos ensaios, permanecendo fixado até o fim de todos os testes referentes aos parâmetros de processo avaliados. Após a realização dos testes com velocidade de corte mais elevada, os corpos de prova foram novamente usinados até um diâmetro externo de 60 mm para a realização dos testes com velocidade baixa.



Figura 3.3 – Corpo de prova pronto para o começo dos testes.

3.3 Parâmetros de corte

Para identificar o impacto das variáveis analisadas nos testes, foi utilizado um projeto de experimentos fatorial tipo 2^k , onde três parâmetros foram avaliados em dois níveis cada. Os parâmetros estudados foram o material, o avanço e a velocidade de corte totalizando 8 combinações. Com exceção do material, os demais parâmetros, apresentados na Tabela 3.2, foram definidos após a realização de pré-testes.

Tabela 3.2 Parâmetros de corte.

Parâmetro	Nível baixo	Nível alto
Vel. de corte (vc)	47,1 m/min	68,3 m/min
Avanço (f)	0,15 mm	0,20 mm

As velocidades de saída do cavaco foram obtidas experimentalmente com o uso da câmera de alta velocidade. O grau de recalque (R_c) foi avaliado através da média entre as diferenças de velocidade antes (vc) e depois da formação do cavaco (vc_{av}), (Eq.2.1) e comparado com a média das espessuras dos cavacos sobre o valor do avanço.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A força de corte foi avaliada para as ligas AISI 6262-T6 e AISI 6351-T6 em função dos diferentes valores de vc e f para três condições do ensaio. Esses resultados são apresentados no apêndice.

4.1 Força de corte

A análise dos resultados indica que mesmo com dureza menor, a liga AISI 6351-T6 apresenta valores maiores de força de corte em comparação à liga AISI 6262-T6 em todas as condições testadas. Uma maior adição de Magnésio (Mg) induz o encruamento e também maior taxa de Silício (Si) forma o composto intermetálico Mg_2Si que torna a rede cristalina mais rígida e endurece a liga enquanto que o silício aumenta a resistência à tração. Comparando apenas velocidades de corte, observa-se que com velocidade mais baixas ambos os materiais apresentaram maior força de corte em todas as condições. Possíveis explicações para isso são que com velocidade de corte menor a temperatura da usinagem não é suficientemente grande para conseguir obter uma diminuição de resistência ao cisalhamento do material, o que resultaria em menor força de corte. A força necessária para formar o cavaco é dependente da resistência ao cisalhamento do material, que é reduzida com o aumento da temperatura. Além disso, segundo Weingaertner e Schroeter (1990), velocidades acima de 60 m/min com ferramenta de aço rápido melhoram o acabamento superficial e reduzem a força de corte.

A Figura 4.1 apresenta gráficos de dois fatores para a força de corte em função do avanço (f) e da velocidade de corte (vc). A influência dos parâmetros testados (Material, Avanço e Velocidade de corte) sobre F_c foi avaliada através de uma análise de variância com nível de significância (α) de 5%, que indicou como parâmetros significativos o material e o avanço. Apesar de não ter influência significativa com um nível de significância de 5%, vc passa a ter influência significativa quando $\alpha = 10\%$. Não foi identificado nenhum efeito de interação significativo. Observou-se também que um aumento do avanço (Fig. 4.1a) gerou um acréscimo na força de corte para ambos os materiais, com variações diferentes. Para a liga AISI 6351-T6, o aumento no avanço resultou em um acréscimo de 32,6% em F_c , contra 21% para o AISI 6262-T6. Outro aspecto possível de se notar foi que para um avanço de 0,15 mm obteve-se um aumento de F_c de 42,4% com a mudança do material AISI 6262-T6 para AISI 6351-T6. Já para o avanço de 0,2 mm, este aumento foi de 55,2%.

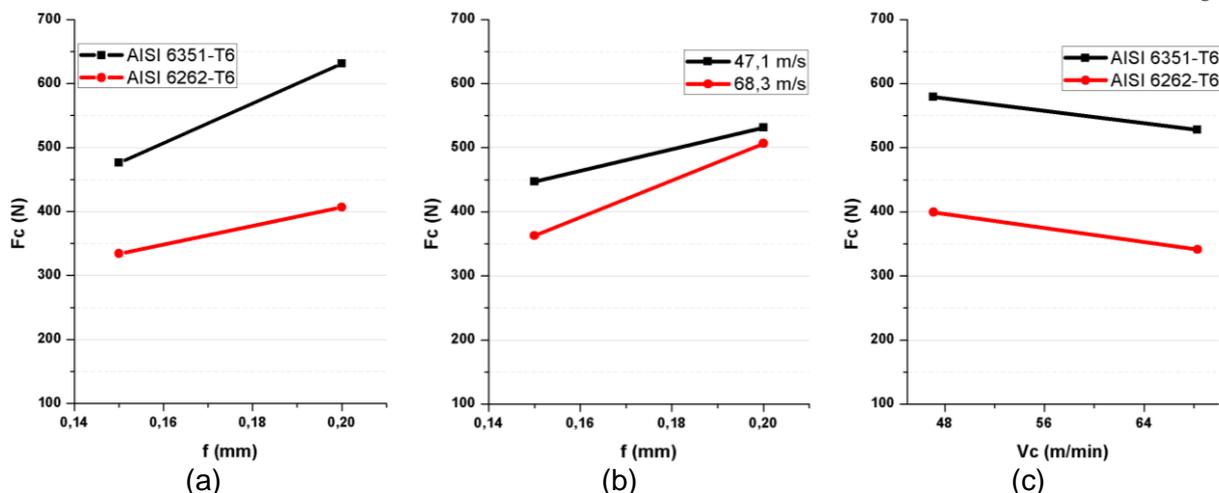


Figura 4.1 Gráficos de dois fatores para Força de corte (F_c).

A Figura 4.1b apresenta F_c em função de f para as duas velocidades de corte avaliadas. Observa-se que um aumento do avanço gerou um acréscimo na força de corte para ambas as velocidades de corte, porém, com variações diferentes. De acordo com a equação de Kienzle (Eq.2.8), com o crescimento do avanço, aumenta a velocidade de avanço e conseqüentemente o coeficiente de atrito diminui, pois o corte se torna mais dinâmico e K_s diminui (Diniz et al., 2008). Também com um aumento do avanço a área de corte na ferramenta aumenta, o que implica em maior força de corte. Para a vc mais baixa obteve-se um acréscimo de F_c de 18,8%. Já para a maior vc esse acréscimo foi de 39,6% para a mesma variação de avanço. Para um avanço de 0,15 mm obteve-se um aumento de F_c de 23,3% com a redução da velocidade vc_2 para vc_1 . Já para o avanço de 0,2 mm, este aumento foi de 4,86%. Ainda que a velocidade de corte não apresente influência significativa sobre F_c com $\alpha = 5\%$, observa-se a redução desta com o aumento de vc para ambos os materiais (Fig. 4.1c). Com maiores velocidades de corte há um aumento na temperatura na zona de corte, com conseqüente diminuição da resistência ao cisalhamento do material, resultando em menores forças de corte. O aumento de vc resultou em uma atenuação de 8,77% para a liga AISI 6351-T6, contra 14,6% para a liga AISI 6262-T6. Com a mudança de material, observou-se um aumento de F_c de 44,9% para a velocidade de corte mais baixa e de 54,8% para a mais elevada.

4.2 Força de avanço

A Figura 4.2 apresenta os gráficos de dois fatores para força de avanço (F_f) em função do f e vc . Os valores da força de avanço são em média menores comparados à força de corte. A análise de variância indicou influência significativa do material avaliado e da velocidade de corte sobre F_f com um nível de significância de 5%. Usando $\alpha = 10\%$, tornam-se significativas as influências do avanço e da interação entre material e avanço. A influência do f é esperada, pois assim como a F_c , esta também aumenta com o aumento do f . Segundo Trent e Wright (2000), a força de usinagem é dependente principalmente das áreas dos planos de cisalhamentos primário e secundário e forças de cisalhamento do material da peça. Como a liga AISI 6351-T6 é mais dúctil, a área de contato cavaco-ferramenta é maior, e maior é a restrição sofrida pelo material durante a passagem do cavaco sobre a superfície de saída da ferramenta, o que gera maiores resultados de F_f , (Fig. 4.2a). Já a liga AISI 6262-T6 sendo menos dúctil, observou-se uma menor variação F_f com o aumento do avanço, pois os cavacos quebram mais facilmente por apresentarem um maior ângulo de cisalhamento. Além disso, a interação significativa entre material e avanço pode ser relacionada à equação de Kienzle, onde o avanço é elevado ao coeficiente z , definido para o material.

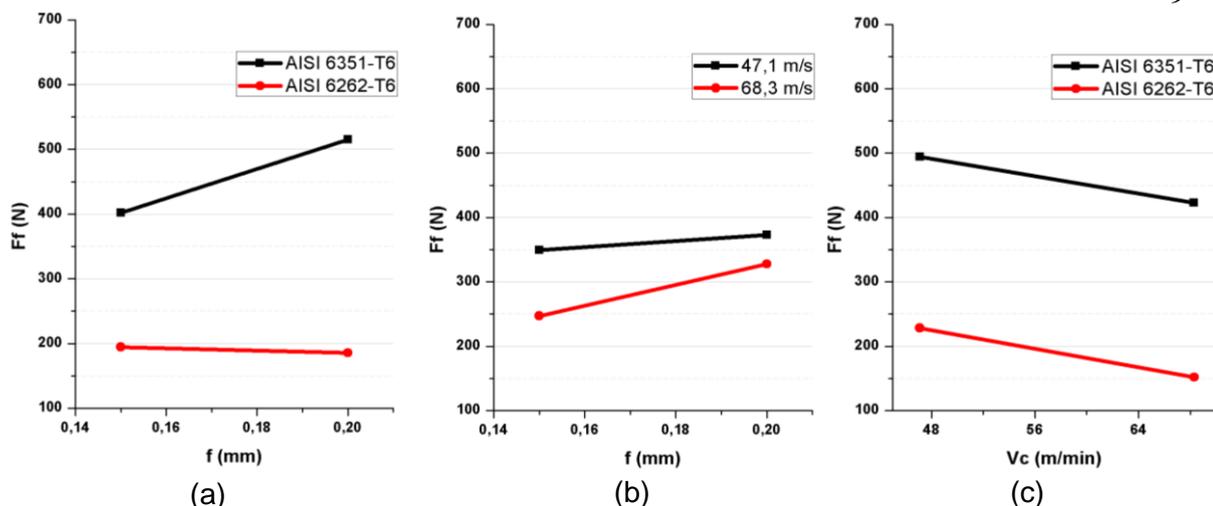


Figura 4.2 Gráficos de dois fatores para Força de avanço (F_f).

A análise da Figura 4.2a mostra que um aumento do avanço resulta num acréscimo da força de avanço para AISI 6351-T6 (28,1%) e num leve decréscimo (4,68%) para a liga AISI 6262-T6. A diferença entre F_f para os dois materiais chega a ser de 178% quando $f = 0,20$ mm. O aumento da velocidade de corte também causou a diminuição da F_f para ambos os materiais (Fig. 4.2c). A força de avanço tende a diminuir com o aumento de v_c , o que pode ser explicado pelo aumento da geração de calor e consequente redução da resistência ao cisalhamento do material. Com um aumento do avanço observou-se também um acréscimo de F_f para ambas as velocidades de corte, porém, com variações diferentes (Fig. 4.2b).

4.3 Grau de Recalque

A Figura 4.3 apresenta os gráficos de dois fatores para o grau de recalque (R_c) em função de f e v_c . Para o AISI 6351-T6 os valores de R_c foram maiores devido à sua maior deformação. A análise de variância indicou influência significativa apenas do material com um nível de significância de 5%. Mesmo mudando para $\alpha = 10\%$, não houve mais nenhuma influência significativa.

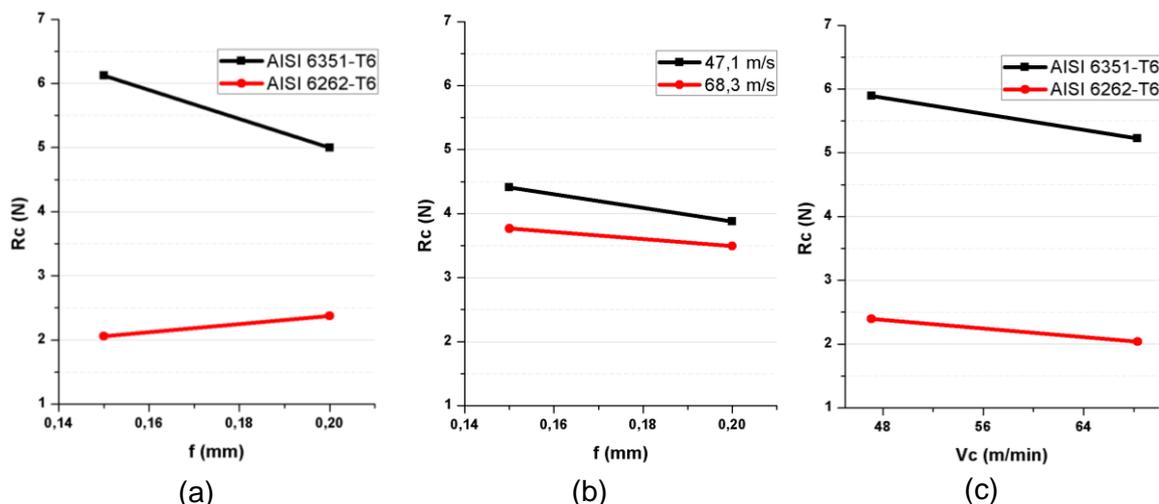


Figura 4.3 Gráficos de dois fatores para grau de recalque (R_c) calculado pelas imagens da câmera.

Observa-se na Figura 4.3a que um aumento do avanço gerou um decréscimo no grau de recalque para a liga AISI 6351-T6 e um acréscimo para AISI 6262-T6. Segundo Machado et al., 2009, o grau de recalque e o ângulo de cisalhamento são bons indicadores da quantidade de

deformação dentro da zona de cisalhamento primária. Quanto maior a deformação, maior R_c . Observou-se valores mais elevados de R_c na usinagem da liga AISI 6351-T6, o que é esperado visto que esta liga é a dúctil entre as estudadas. O aumento do avanço causa um aumento da área da seção de corte, resultando em maior resistência ao movimento do cavaco, com menores valores de ângulo de cisalhamento e conseqüente aumento no comprimento da zona de cisalhamento primária. O aumento de v_c (Fig. 4.3c) causa um aumento na geração de calor e diminuição da resistência ao cisalhamento do material, o que favorece o movimento do cavaco sobre a superfície de saída da ferramenta. Assim, a quantidade de deformação e conseqüentemente o valor de R_c decresce. Com um aumento da taxa de deformação também há um enrijecimento do material o que provoca um aumento na velocidade de saída do cavaco e conseqüentemente redução no valor de R_c .

A liga AISI 6262-T6 apresenta menor ductilidade, o que resulta em menor deformação do material antes da ruptura e maior curvatura do cavaco, com ângulos de cisalhamento maiores. Para o AISI 6351-T6, obteve-se um decréscimo de 18,3% no R_c do avanço menor para o maior. Já para o AISI 6262-T6 o acréscimo foi de 15,3% de R_c para a mesma variação de avanço. Para um avanço de 0,15 mm obteve-se um aumento de 197% para R_c com a mudança do material AISI 6262-T6 para AISI 6351-T6. Já para o avanço de 0,2 mm, este aumento foi de 110%. Para o aumento de v_c a liga AISI 6351-T6 obteve uma redução de 11,3%. Para a liga AISI 6262-T6 obteve-se redução de 14,9%. Com a mudança de material e assumindo v_{c1} , obteve-se 146%; para v_{c2} , obteve-se 156% de acréscimo no R_c .

As fortes diferenças entre propriedades das ligas utilizadas associadas a seu comportamento em usinagem podem fazer com que a análise de variância considere em menor grau as influências dos parâmetros de processo sobre as variáveis estudadas. Visando avaliar os efeitos sem a influência dos materiais, foram realizadas análises de variância por material estudado, resultando em dois experimentos 2^2 . Dentre esses, o avanço apresentou influência significativa sobre a força de corte em ambos os materiais e sobre a força de avanço para a liga AISI 6351-T6. A ANOVA realizada para cada material não indicou nenhuma influência significativa dos parâmetros de processo avaliados sobre o grau de recalque.

A Tabela 4.1 apresenta valores médios de R_c calculados através da análise das imagens feitas com a câmera de alta velocidade Phantom v.411 e das espessuras dos cavacos medidos com o microscópio AM-413ZT para todos os parâmetros de corte utilizados. Para a avaliação do R_c pelas imagens da câmera de alta velocidade, foi calculada a razão entre o deslocamento de um ponto do material antes e depois de passar pela aresta da ferramenta no mesmo intervalo de tempo. O cálculo do R_c a partir da espessura do cavaco foi realizado pela razão entre a espessura do cavaco pela espessura do material indeformado, neste caso equivalente ao avanço. Ambos os resultados foram calculados a partir da (Eq.2.2).

Tabela 4.1 Grau de recalque.

Grau de recalque (R_c) para Câmera	AISI 6351-T6		AISI 6262-T6	
	V_{c1} (m/min)	V_{c2} (m/min)	V_{c1} (m/min)	V_{c2} (m/min)
f1 - 0,15 mm	6,621	6,275	2,410	1,778
f2 - 0,20 mm	5,820	5,006	2,274	2,052
Grau de recalque (R_c) para Espessura	AISI 6351-T6		AISI 6262-T6	
	V_{c1} (m/min)	V_{c2} (m/min)	V_{c1} (m/min)	V_{c2} (m/min)
f1 - 0,15 mm	6,146	6,405	2,015	1,737
f2 - 0,20 mm	5,813	5,840	1,956	1,622

4.4 Estado das ferramentas de corte

As Figuras 4.4 e 4.5 apresentam as arestas da ferramenta de corte após a usinagem com cada condição avaliada. Observou-se material aderido à ferramenta de corte em quase todos

os parâmetros avaliados. Após a usinagem da liga AISI 6262-T6, observou-se maior ocorrência de aresta postiça de corte ao usinar com velocidade de corte $vc1$ e avanço $f1$, seguida da condição com $vc2$ e $f1$. Nas demais condições, a deposição de material foi muito pequena. Na usinagem da liga AISI 6351-T6 observou-se comportamento oposto: com $vc1$ houve aumento da ocorrência de aresta postiça de corte (APC) associado ao aumento do avanço. Já para a $vc2$, houve maior deposição de material quando se usou avanço $f1$. Em $vc1$, um aumento no avanço em AISI 6262-T6 ocasionou um menor índice de APC. Na liga AISI 6351-T6 houve um aumento na APC para mesma vc . Possíveis explicações são que o aumento do avanço aumentou a área da seção de corte e obteve-se maior quantidade de material cortado, e como o alumínio tem baixo ponto de fusão, houve aparição de APC em quase todos os parâmetros testados. Problemas relacionados com a ocorrência de APC são a diminuição da qualidade do acabamento, e também, quando arrancada da ferramenta, esta pode levar pequenas quantidades de material da aresta de corte, o que é conhecido como mecanismo de desgaste por aderência e arrastamento (Ferraresi, 1977). Como a liga AISI 6351-T6 é mais dúctil, ocorreu maior deposição de material que na liga AISI 6262-T6 devido à maior superfície de contato com a ferramenta na usinagem desta liga. A ocorrência de APC pode ser reduzida com aplicação de fluido de corte, velocidades de corte maiores e melhor acabamento da ferramenta (Weingaertner e Schroeter, 1990), além da adoção de ferramentas com arestas afiadas (sem raio de arredondamento na aresta) e com ângulos bastante positivos (Diniz et al., 2008). A Tabela 4.2 apresenta as dimensões das arestas postiças de corte observadas em cada condição avaliada.

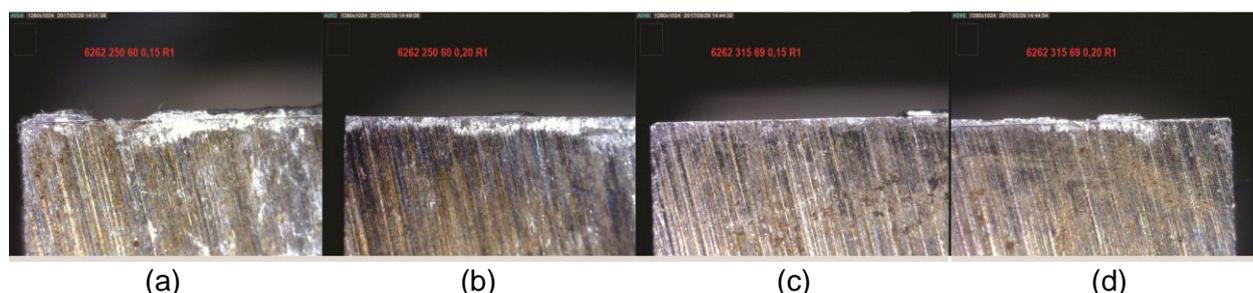


Figura 4.4 Arestas das ferramentas de corte de AISI 6262-T6; (a) $vc1, f1$; (b) $vc1, f2$; (c) $vc2, f1$; (d) $vc2, f2$.

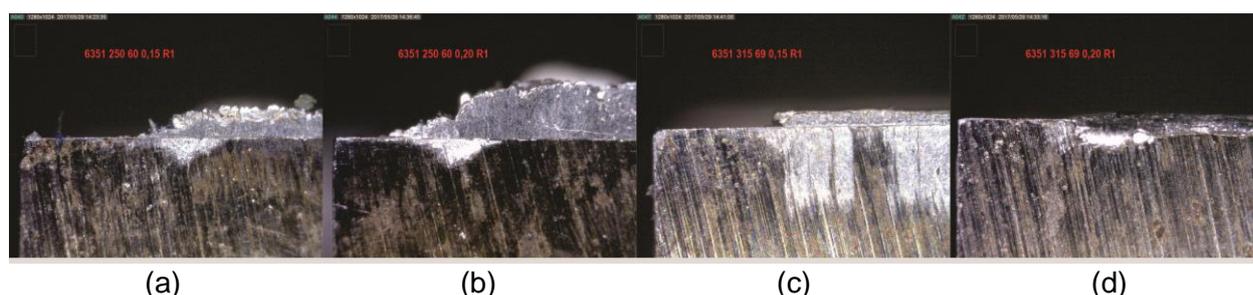


Figura 4.5 Arestas das ferramentas de corte de AISI 6351-T6; (a) $vc1, f1$; (b) $vc1, f2$; (c) $vc2, f1$; (d) $vc2, f2$.

Tabela 4.2 Diferenças de tamanhos de APC em relação à vc e f .

AISI 6351-T6		AISI 6262-T6	
Vc1 - f1	Vc1 - f2	Vc1 - f1	Vc1 - f2
menor	maior	Maior	quase zero
Vc2 - f1	Vc2 - f2	Vc2 - f1	Vc2 - f2
maior	menor	quase zero	quase zero

4.5 Cavacos gerados

A Figura 4.6 apresenta a formação de cavaco durante a usinagem das ligas estudadas. A liga AISI 6262-T6 apresentou cavacos do tipo espiral plana (classificação 3.1 segundo a norma ISO 3685/1993) em todas as condições avaliadas, com eventuais ocorrências de cavaco em arco solto (classificação 6.2). Comparados aos apresentados na outra liga são mais favoráveis à usinagem, gerando melhor qualidade na superfície da peça e maior proteção do operador. Os cavacos gerados na usinagem da liga AISI 6351-T6 foram do tipo fita longa (classificação 1.1) e helicoidal tipo arruela (classificação 3.1) com elevados raio de curvatura, podendo causar danos ao suporte e à quina da ferramenta de corte. A Figura 4.7 apresenta cavacos formados nas diferentes condições avaliadas.

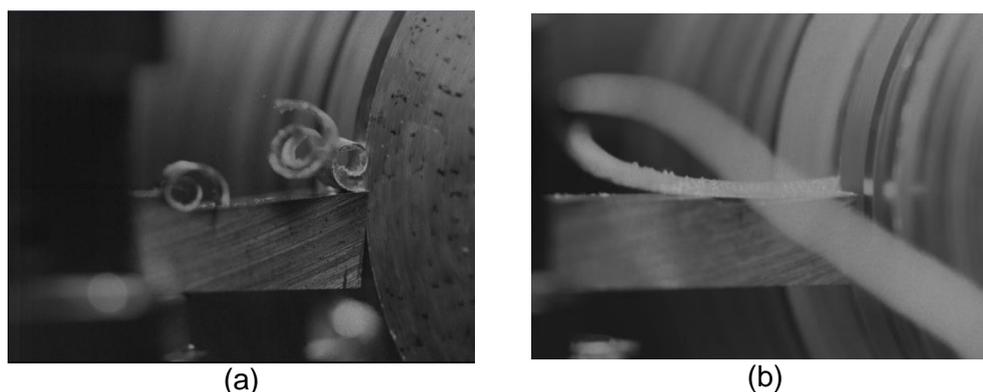


Figura 4.6 Cavacos das ligas AISI 6262-T6(a) e AISI 6351-T6(b).

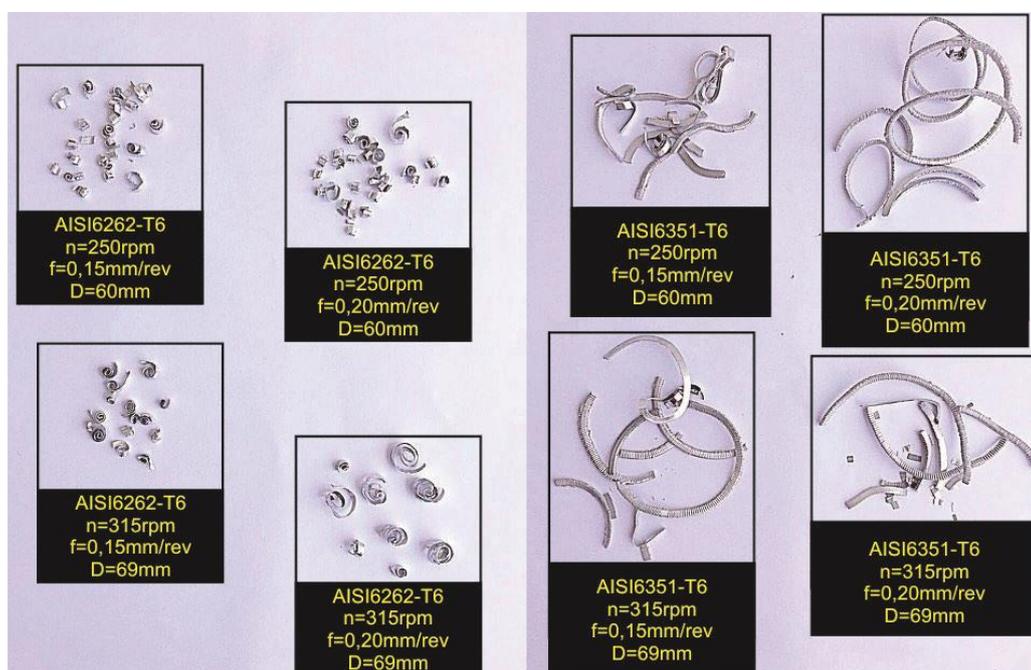


Figura 4.7 Cavacos para cada parâmetro de corte adotado.

5. CONCLUSÕES

A análise de resultados permite concluir que para as condições e materiais avaliados:

- A influência da liga utilizada é maior que a dos parâmetros avaliados sobre todas as variáveis de saída estudadas.
- Entre os parâmetros de processo, a influência do avanço sobre a força de corte é significativa para ambos os materiais. Influência significativa de f sobre a força de avanço foi também observada para a liga AISI 6351-T6.
- Nenhum dos parâmetros de processo avaliados apresentou influência significativa sobre o grau de recalque nos níveis avaliados neste estudo. Somente a liga usinada demonstrou influenciar de forma significativa esta variável de resposta.
- A velocidade de corte (vc) apresentou influência significativa sobre a F_f com nível de significância (α) de 5%. Ao usar $\alpha = 10\%$, observou-se influência significativa de vc sobre a força de corte.
- Os valores de R_c medido pela espessura do cavaco e pela câmara mostram boa concordância. A avaliação das imagens da câmara de alta velocidade se mostrou muito adequada para o estudo dinâmico do corte.
- O surgimento de deposição de material na ferramenta de corte mostrou-se de acordo com a teoria, com velocidades de corte baixas resultando na adesão de material da peça na ferramenta de corte na usinagem da liga AISI 6351-T6. Devido às diferenças de elementos de liga entre os materiais analisados, a usinagem do material mais dúctil (AISI 6351-T6) resultou em maior adesão de material na velocidade mais baixa combinada com avanço mais alto, o que se mostra exatamente oposto aos dados apresentados na liga AISI 6262-T6 com os mesmos parâmetros de corte.
- Apesar de o custo da liga AISI 6262-T6 ser mais elevado que o da liga AISI 6351-T6, os parâmetros analisados mostram que esta liga requer menos da máquina operatriz por apresentar menores esforços e, conseqüentemente, menor potência durante a usinagem. Tais valores contribuem também para que aumente a vida da ferramenta de corte, resultando em economia. Mostrando-se menos dúctil, a liga de alumínio AISI 6262-T6 gerou cavacos mais curtos, os quais apresentam maior proteção do operador.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas); NBR 6175: “**A importância dos Processos mecânicos de usinagem**”, Rio de Janeiro, 2015.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas); NBR 6162 – “**Movimentos e Relações Geométricas na Usinagem dos Metais**”, Rio de Janeiro, 1989.

BELHADI, S. “**Experimental and numerical study of chip formation during straight turning of hardened AISI 4340 steel**”. J. Engineering Manufacture, Part B, vol. 219, p. 515-524, 2005.

BOOTHROYD, G. “**Fundamentals of metal machining and machine tools**”. London: McGraw-Hill Internacional Book Company, 1981.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. “**Tecnologia da usinagem dos materiais**”. 6.ed. São Paulo: Artliber Editora 262 p., 2008.

FERRARESI, D. “**Fundamentos da usinagem dos metais**”. Editora Edgard Blücher, São Paulo: 1977.

FIGUEIREDO, K. M. “**Mapeamento dos Modos de Transferência Metálica na Soldagem de Alumínio**”. 74f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2000.

HONG, S. Y.; DING, Y. Cooling approaches and cutting temperatures in cryogenic machining of Ti-6Al-4V. “**International Journal of Machine Tools & Manufacture**”. V. 41, n. 10, p. 1417-1437, aug 2001.

KLOSE, Hans-Jürgen, “**Einfluss der Werkstoffmorphologie auf die Zerspanbarkeit niedriglegierter Gusseisen**”. Berichte aus dem Institut für Fertigungstechnik und Spanende Werkzeugmaschinen – Universität Hannover. Düsseldorf: VDI Verlag, nº 297. 174S, 1993.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; Da SILVA, M. B. “**Teoria da Usinagem dos Metais**”. São Paulo; Edgard Blucher, p 751., 2009.

MERCHANT, M. E. “**An interpretive look at the 20th century research on modeling of Machining Science and Technology**”, v. 2, p. 157-163, 1998.

MILLER, W.S., ZHUANG, L., BOTTEMA, J., WITTEBROOD, A.J., DE SMET, P., HASZLER, A. “**Recent development in aluminium alloys for the automotive industry**. J Mater Sci Eng”, A280, pp. 37-49, 2000

MITSUBISHI MATERIALS. “**Efeitos das condições de corte para torneamento**”. Disponível em: www.mitsubishicarbide.net/contents/mht/pt/html/product/technical_information/information/turning_effects.html
Acesso em: Fev. 2017.

NG, E.-G.; ASPINWALL, D.K. “**The Effect of Workpiece Hardness and Cutting Speed on the Machinability of AISI H13 Hot Work Die Steel When Using PCBN Tooling**”. Transactions of the ASME. Vol. 124, p. 588-594, 2002.

PANTALE, O. et al. “**2D and 3D numerical models of metal cutting with damage effects** Comput. Mech. Engrg”. Vol. 193, p. 4383-4399, 2004.

ROY, P.; SARANNGI, S. K.; GHOSH, A.; CHATTOPADHYAY, A. K. **“Machinability study of pure aluminium and Al-12% Si alloys against uncoated and coated carbide inserts”**. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials. V. 27, n. 3, p. 535-544, may 2009.

SANTOS JR., M.C., **“Emprego de Ferramentas Estatísticas para Avaliação da Usinabilidade de Ligas de Alumínio”**, Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 2012

SMERD, R., WINKLER, S., SALISBURY, C., WORSWICK, M., LLOYD, D., FINN, M.. **“High strain rate tensile testing of automotive aluminum alloy sheet. International Journal of Impact Engineering”**. Vol. 32 (1–4), pp. 541-560, 2005.

SOUZA, A. J. **“Processos de fabricação por usinagem”**, apostila, DEMEC – UFRGS, Porto Alegre, 2011.

SHAW, M. C., **“Metal Cutting Principles”**. 2.ed. New York: Oxford University Press. 594p, 1986.

TANG, Z. T.; LIU, Z. Q.; PAN; Y. Z.; WAN; Y.; AI; X. **“The influence of tool flank wear on residual stresses induced by milling aluminum alloy”**. Journal of Materials Processing Technology. V. 209, n. 9, p. 4502-4508, may 2009.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**. 4. Ed. Boston; Butterworth Heinemann, 439 p., 2000.

VERNAZA-PEÑA, K.M., MASON, J.J., LI, M., **“Experimental Study of the Temperature Field Generated During Orthogonal Machining of an Aluminum Alloy”**. Experimental Mechanics, VoL 42, No. 2, pp. 221-229, 2002.

WEINGAERTNER, W. L.; SCHROETER, R. B. **“Tecnologia de usinagem do alumínio e suas ligas”**, 1ªed, São Paulo, 1990.

APÊNDICE

A Figura 0.1 apresenta valores médios das forças de corte (F_c) obtidas na usinagem das ligas AISI 6351-T6 e AISI 6262-T6. Esses resultados compõem uma média aritmética dos valores medidos pelo dinamômetro em relação a cada combinação de parâmetros de corte avaliada.

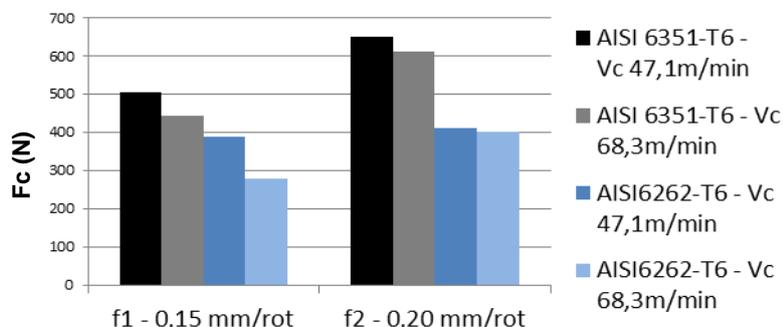


Figura 0.1 Média das forças de corte em relação ao avanço.



Figura 0.2 Método de medidas das espessuras dos cavacos do AISI 6262.

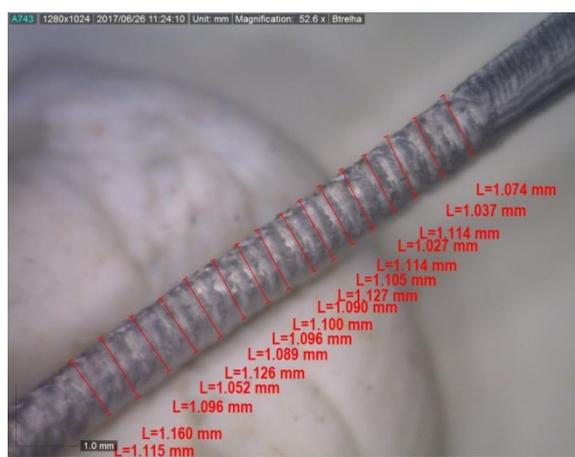


Figura 0.3 Método de medidas das espessuras dos cavacos do AISI 6351.