

PRECISÃO DIMENSIONAL E ACABAMENTO NA SUPERFÍCIE DO ALUMÍNIO AERONÁUTICO 7075-T7 NO PROCESSO DE FRESAMENTO DE TOPO

Mauro Paipa Suarez

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Av. João Naves de Ávila, 2.121, Uberlândia –
MG, 38.408-100, Brasil
mpsuarz@mecanica.ufu.br

Álisson Rocha Machado

alissonm@mecanica.ufu.br

Eder Costa Silva

eder@div.cefetmg.br

Resumo: O objetivo deste trabalho é apresentar as bases do projeto intitulado PRECISÃO DIMENSIONAL E ACABAMENTO NA SUPERFÍCIE DO ALUMÍNIO AERONÁUTICO 7075-T7 NO PROCESSO DE FRESAMENTO DE TOPO. Este projeto analisa a precisão dimensional e o acabamento das superfícies de canais usinados pelo processo de fresamento de topo quando muda-se as condições de corte (velocidade de corte, avanço por dente, penetração radial, aplicação de fluido de corte, espaçamento entre canais, tamanho do corpo de prova, comprimento em balanço da fresa). Uma análise de temperatura e da vibração será feita com objetivo de relacioná-las com a exatidão dimensional e o acabamento da peça. Os primeiros testes serão programados utilizando um planejamento fatorial completo a dois níveis, através dele determinar-se-á quais variáveis são as mais influentes no processo para posteriormente com elas realizar um planejamento composto central e uma superfície de resposta com a qual se espera encontrar os valores ótimos para obter a maior precisão e melhor. Para a medição da temperatura será utilizado um sensor infravermelho Raytek Thermalert TX, e a vibração será medida com um acelerômetro (Brüel & Kjær), com esta pesquisa pretende-se demonstrar como o alumínio se deformará em menor proporção com grandes aumentos na velocidade de corte (High Speed Machining), isto devido à diminuição no tempo de propagação do calor gerado na interface de contato ferramenta- cavaco- peça.

Palavras-chave: *Fresamento de topo, Penetração Radial, High Speed Machining, Precisão dimensional.*

1. INTRODUÇÃO

Um dos processos de fabricação mais utilizados na indústria é o fresamento, isto graças a sua geometria multi-cortante (duas ou mais arestas de corte) que permite tirar grandes volumes de material num tempo reduzido, além disso, o fresamento é um processo de alta flexibilidade, permitindo movimentar a peça e/ou a ferramenta em um, dois, três ou mais eixos (lineares ou giratórios) (Marcelino. et al., 2004). Ao contrário do torno que executa apenas peças rotacionais (perfis de revolução), a fresadora é uma máquina elaborada para a usinagem de peças prismáticas, sendo utilizada na fabricação de superfícies planas, contornos, ranhuras e cavidades, entre outras.

Dentre as possíveis variações do processo de fresamento, uma das que possui maior emprego nos setores de ferramentaria atualmente é o fresamento de topo.

A grande gama de materiais, somado às novas tendências nos processos de usinagem determinam a produtividade da indústria metal-mecânica atual. Tendências estas que disponibilizam

máquinas-ferramenta de alta tecnologia, permitindo a elevação das condições de corte, mais efetivamente das velocidades de corte e avanço e, por conseguinte o aumento da produtividade.

Este aumento na taxa de produção e na qualidade das peças são variáveis que exigem, não somente pesquisa e desenvolvimento de novas máquinas e ferramentas, mas também das condições ótimas de usinagem para conseguir resultados favoráveis para a indústria.

Na indústria metal-mecânica alguns materiais possuem excelente usinabilidade quando se consideram fatores como vida de ferramenta, potência, força ou temperatura de corte, entre outros, onde o alumínio é um bom exemplo. Entretanto, quando a precisão dimensional é o principal foco, esta usinabilidade pode não ser a mesma. Para se obter peças com boa precisão dimensional é fundamental dispor de máquinas-ferramentas potentes, precisas e rígidas; que os sistemas de fixação da peça e da ferramenta sejam também igualmente rígidos e adequados; que a peça seja inerentemente pura, de qualidade, sem defeitos de fundição ou de processamento e que a ferramenta seja dimensionalmente precisa e feita de um material que irá garantir integridade durante seu uso. (Machado e Da Silva, 2004).

Mesmo garantindo os requisitos citados, um grande problema na usinagem das ligas de alumínio é que o mesmo apresenta relativamente grandes coeficientes de dilatação de $23 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ contra $11 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ do aço e baixo módulo de elasticidade aproximadamente 1/3 do módulo para o aço comum ao carbono (Weingaertner e Schroeter, 1991). Com o aquecimento da peça, gerado pelo processo de deformação durante a usinagem, a variação dimensional se apresenta devido à dilatação causando, portanto, um sobre-corte inevitável.

Esta dilatação acontece devido aos altos níveis de temperatura, somados às tensões presentes no processo de corte. Na usinagem dos metais quase toda a energia consumida é convertida em calor, que é gerado nas zonas de cisalhamento primária e secundária, e eventualmente entre a peça e a superfície de folga da ferramenta. Este calor tem um aumento diretamente proporcional ao aumento da velocidade de corte, onde a dissipação desse calor é realizada pelo cavaco, pela ferramenta, pela peça e pelo meio ambiente (o qual pode ser um fluido de corte ou simplesmente o ar presente no meio). A relação existente entre o calor gerado na zona de cisalhamento e o calor dissipado é o que se conhece como balanço energético na usinagem. Neste balanço, a fração de calor dissipado para a peça é responsável pelo seu aquecimento e consequentemente pelo desvio dimensional do componente usinado. Assim, para se obter maior qualidade dimensional, esta parcela de calor deve ser minimizada.

Para se obter diminuição no calor que se propaga para a peça tem-se que levar em conta o comportamento das fontes de calor e dos dissipadores, ou seja, precisa-se adequar os parâmetros de corte de tal forma que o calor dissipado pela peça diminua.

Ao se aumentar a velocidade de corte, por exemplo, sabe-se que a geração de calor é aumentada proporcionalmente, mas se a parcela de calor que dissipa para os outros elementos, como por exemplo, para o cavaco, e para o meio ambiente, também for aumentada em maiores proporções, para se manter o balanço energético (calor gerado igual ao calor dissipado), a parcela de calor que é dissipada pela peça, pode diminuir. Se isto ocorrer, a precisão dimensional das peças usinadas podem ser maior.

Para se conseguir aumentar a velocidade, para que a peça comece a dissipar menor quantidade de calor, é preciso ter uma ferramenta que responda a tais exigências. Na atualidade as ferramentas mais recomendadas para usinagem em altas velocidades de um material tão dúctil como o alumínio são as ferramentas de PCD (Polycrystalline Diamond) as quais possuem alta dureza em temperaturas elevadas e um baixo coeficiente de atrito na zona de contato do cavaco-ferramenta, aliviando assim as tensões geradas pelo contato.

Este trabalho pretende verificar quantitativamente como as principais variáveis do processo de fresamento de topo afetam a precisão dimensional e o acabamento de canais fresados na liga de alumínio 7075 – T7, liga de alumínio mais usada na indústria aeronáutica.

O tratamento e análise dos dados será feito através de planejamento experimental, permitindo determinar as variáveis que exercem maior influência no desempenho de um processo (Calado, 2003).

2. METODOLOGIA DE TRABALHO

A peça a ser investigada é o alumínio aeronáutico 7075-T7 (designação dada pela *The Aluminum Association Inc*, associação americana). Os resultados encontrados podem ser utilizados para uma melhor seleção dos parâmetros de corte a serem utilizados em determinadas situações, para que se encontre a melhor relação custo-benefício de cada processo.

O trabalho terá como metodologia a usinagem de múltiplos canais, variando-se as condições de corte listadas a seguir para posterior análise do processo de fresamento de topo:

- Velocidade de corteentre 100 e 400 m/min
- Avanço por denteentre 0.025 e 0.15
- Profundidade de corteentre 0.5 e 2.5 mm para PCD e até 6 mm HSS.
- Comprimento em balanço da fresaentre 42 e 52 mm
- Utilização de fluido de corte
 - Convencional (inundação)
 - (MQF)
 - Corte a seco
- Espaçamento entre os canaisentre 0.5 e 2.5 mm
- Dimensão do corpo de provaentre 20 e 100 mm

Com a variação destes parâmetros pretende-se definir qual ou quais variáveis têm maior influência na exatidão dimensional. Para tanto serão usinados múltiplos canais e em seguida serão medidas a largura, a profundidade do canal e a rugosidade do mesmo (superfície de fundo e lateral do canal. Esta última apenas quando a profundidade de corte for adequada para a utilização do apalpador devido a restrições de medição). Durante os testes pretende-se monitorar a vibração do eixo árvore da máquina-ferramenta, para posteriormente relacioná-la com os resultados dimensionais. Pretende-se ainda realizar alguns testes para se medir a temperatura em tempo real da superfície usinada utilizando um sensor infravermelho. Para tanto, os testes devem ser realizados na condição a seco, por restrições do método em se utilizar fluidos de corte. Visa-se com estes testes verificar como os principais parâmetros de corte afetam a dissipação do calor na peça.

Para o projeto dos experimentos e análise das variáveis serão utilizadas as técnicas estatísticas de planejamento fatorial fracionário, fatorial completo e planejamento composto central e posteriormente uma superfície de resposta para o modelo de otimização das variáveis quantitativas.

A seguir serão descritas as etapas de realização deste trabalho.

3. ETAPAS DO PROJETO

3.1. Etapa 1: Revisão bibliográfica

Na procura da solução de um problema o primeiro passo é conhecê-lo a fundo. Nesta primeira etapa procura-se conhecer a maior quantidade de detalhes possíveis referentes ao processo de fresamento de topo e os tipos de materiais utilizados na indústria atual, dessa forma dimensionar e focalizar as necessidades atuais de precisão e acabamento para peças usinadas por este processo, fazer o levantamento do estado da arte da precisão e acabamento de peças usinadas pelo processo de fresamento e determinar os principais focos de direcionamento das pesquisas desenvolvidas nesta área.

Para tanto, pretende-se utilizar exaustivamente o portal da CAPES, a internet e suas ferramentas de busca, os periódicos e todo o acervo da biblioteca da Universidade Federal de Uberlândia, sistemas de empréstimos (COMUT), livros e artigos da biblioteca pessoal do orientador, entre outras fontes.

3.2. Etapa 2: Aquisição e preparação das ferramentas e materiais para os ensaios de usinabilidade

A empresa EMBRAER foi contatada e se interessou pela investigação, fornecendo gratuitamente o material. Em função da maior aplicação dentro da empresa, definiram a liga ASTM 7075 – T7 liga endurecida que tem relativamente alta resistência mecânica, utilizado na construção de aeronaves.

Este material foi fornecido pela companhia em barras quadradas de 100 mm de lado e aproximadamente 1.6 metros de comprimento. Os corpos de provas deverão ser cortados no LEPU (Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem), em dimensões mais reduzidas segundo as necessidades dos testes.

No caso das ferramentas de corte, a empresa Mapal do Brasil ficou interessada na proposta de avaliar o comportamento de fresas de topo, especificamente aquelas utilizadas na usinagem de alumínio (PCD com corpo de metal duro). A empresa OSG também foi contactada e poderá fornecer fresas de metal duro. Assim a pesquisa deverá ser conduzida com ferramentas que o mais breve possível se tornaram disponíveis, havendo possibilidade de utilizar as duas.

O fluido de corte será fornecido pela empresa Blasser do Brasil, eles ficaram interessados em avaliar o comportamento, dos tipos de aplicação MQF e JORRO neste tipo de liga, fornecendo o fluido mais adequado para cada tipo de aplicação.

3.3 Etapa 3 – Caracterização do material da peça

O material da peça, alumínio aeronáutico 7075-T7, deverá ser caracterizado quanto à dureza, resistência à tração e metalografia. Para tanto, corpos de provas deverão ser retirados da barra de material fornecido pela Embraer para ensaios de laboratórios específicos. Para os testes de dureza e metalografia, os corpos de provas serão retirados da seção transversal da barra e as caracterizações feitas considerando toda a área, de maneira a poder identificar possíveis variações do centro para a periferia. A dureza a medir será a Brinell. Para a metalografia os corpos de prova serão lixados, polidos e atacados com reagente apropriado para posterior análise e fotografias no microscópio ótico.

Os corpos de prova para o ensaio de tração deverão ser confeccionados segundo a norma ASTM D 638-95. Serão considerados, principalmente os limites de escoamento ($\sigma_{0,2}$) e de resistência, a estricção e o alongamento.

3.4 Etapa 4- Planejamento do experimento e Pré-testes de usinagem

Nesta etapa todo o planejamento estatístico dos experimentos será elaborado, baseado em modelos estatísticos (fatorial completo e fracionado para verificação de influências de variáveis, planejamento composto central para modelagem e superfície de resposta para otimização das variáveis quantitativas).

Com o material definido para realizar os testes, é necessário determinar as faixas nas quais vão variar cada uma das condições de corte, procurando-se utilizar as condições normais (usinagem suave) e limites (usinagem severa) de cada variável para uma descrição correta das curvas e diferentes comportamentos nas respostas. Determinar estas faixas baseando-se apenas na literatura é um trabalho árduo, e na maioria das vezes impreciso. Portanto, serão realizados pré-testes que têm como objetivo buscar os níveis das variáveis de entrada mais apropriados para serem utilizados nos testes propriamente ditos.

3.5 Etapa 5: Testes Experimentais

Para os testes de usinagem será utilizada uma máquina fresadora Discovery 760 de ótima rigidez, com variações contínuas de rotação (de 10 a 10.000 RPM) e velocidade de avanço programável (de 1 a 5000 mm/min) e potência de 12,5 cv.

O tamanho dos corpos de prova será confeccionado de tal forma que minimize a sucata do material por corpo, incluindo as peças nas quais vai-se analisar o espaçamento entre canais e tamanho do corpo de prova.

Os primeiros testes experimentais irão focar na análise da variação dos parâmetros (v_c , f_z , a_p , comprimento em balanço da fresa, utilização de fluido de corte “Convencional, MQF, SECO”, espaçamento entre os canais, dimensão do corpo de prova (volume dissipador de calor)) através de um planejamento fracionário a dois níveis. Este procedimento tem a finalidade de conhecer a(s) variável(s) menos influente(s), para posteriormente fixá-las e avaliar a influência das demais variáveis. Dessa forma procura-se dividir o total das variáveis em dois grupos, aquelas que não geram mudanças consideráveis no acabamento e exatidão da peça, e aquelas que alteram a exatidão e o acabamento em maior proporção. Caso haja incompatibilidade dos resultados com relação à precisão e acabamento, as definições serão baseadas primeiramente com base na precisão dimensional. Esta exatidão e acabamento vão ser medidos levando em consideração as normas para utilização dos instrumentos para medição de comprimentos (paquímetros, micrometros e apalpadores eletrônicos, microscópio ótico e o circularímetro para o caso da medição da largura do canal e o rugosímetro, no caso do acabamento da superfície).

3.5.1 Pre-teste com a liga 6351-T6

Para análise do comportamento das variáveis (velocidade de corte, avanço por dente, a_p , revestimento da ferramenta e aplicação de fluido de corte) foram usinados canais de 10 mm de largura e o acabamento foi analisado, em forma de pré-teste, na liga alumínio silício 6351-T6, isto devido à semelhança em alguns dos testes que servirão como guia para análise do comportamento do alumínio. A tabela 1 e 2 apresentam o planejamento utilizado nestes testes e o quadro ANOVA respectivamente mostrando o efeito das variáveis.

Tabela 1 Planejamento fracionário 2^{5-1}

v_c m/min	f mm	a_p mm	revestimento	fluido
p				
100	0.03	1	SEM/REV	JORRO
160	0.03	1	SEM/REV	SECO
100	0.06	1	SEM/REV	SECO
160	0.06	1	SEM/REV	JORRO
100	0.03	2	SEM/REV	SECO
160	0.03	2	SEM/REV	JORRO
100	0.06	2	SEM/REV	JORRO
160	0.06	2	SEM/REV	SECO
100	0.03	1	TiN	SECO
160	0.03	1	TiN	JORRO
100	0.06	1	TiN	JORRO
160	0.06	1	TiN	SECO
100	0.03	2	TiN	JORRO
160	0.03	2	TiN	SECO
100	0.06	2	TiN	SECO
160	0.06	2	TiN	JORRO

Tabela 2 Efeitos das variáveis ANOVA

	Effect	p	-95.%	+95.%	Coeff.	-95.%	+95.%
Mean/Interc.	1.363333	0.000000	1.245292	1.481375	1.363333	1.245292	1.481375
(1)velocidade de corte m/min	0.237500	0.048842	0.001417	0.473583	0.118750	0.000709	0.236791
(2)avanço por dente mm/min	0.642500	0.000069	0.406417	0.878583	0.321250	0.203209	0.439291
(5)fluido de corte	0.525833	0.000396	0.289750	0.761916	0.262917	0.144875	0.380958

A tabela 2 mostra os efeitos estimados e os respectivos coeficientes das cinco variáveis e algumas combinações que influem no acabamento da superfície do material obtidos com a ferramenta Statistic versão 6.0.

O valor de “p” menor a 0.05 na tabela 2 mostra, com 95% de confiança, quais variáveis são influentes na rugosidade do material e a coluna de “coeff” mostra em que magnitude a rugosidade é afetada.

Levando em consideração que as ferramentas utilizadas foram de aplicação geral (utilizadas para cortar diferentes tipos de materiais) os resultados obtidos nestes pré-testes mostraram grandes efeitos na rugosidade principalmente com as mudanças no avanço, na velocidade de corte e na aplicação de fluido na forma convencional (jorro).

O avanço se apresenta como a variável mais influente com um efeito de 64% quando se passa do nível -1 para o nível 1, com o aumento do avanço as marcas deixadas pela ponta da ferramenta geram picos mais altos e vales mais profundos, além de aumentar a força de corte pelo aumento na zona de contato ferramenta peça prejudicando o acabamento devido as deformações na superfície da peça.

Com o aumento da velocidade, a rugosidade aumentou em 23%, isto possivelmente foi devido à geometria da ferramenta, inadequada para cortar alumínio, pois pequenas cavidades não permitem a saída do cavaco corretamente e geraram empastamento.

No caso do fluido de corte, a aplicação tipo jorro resfria a zona de corte diminuindo deformações no alumínio, e possivelmente tenha um efeito lubrificante nas velocidades menores diminuindo as forças de corte e melhorando o acabamento num 52%.

A figura 1 mostra a influência individual das variáveis sobre a superfície da peça representada num gráfico de pareto.

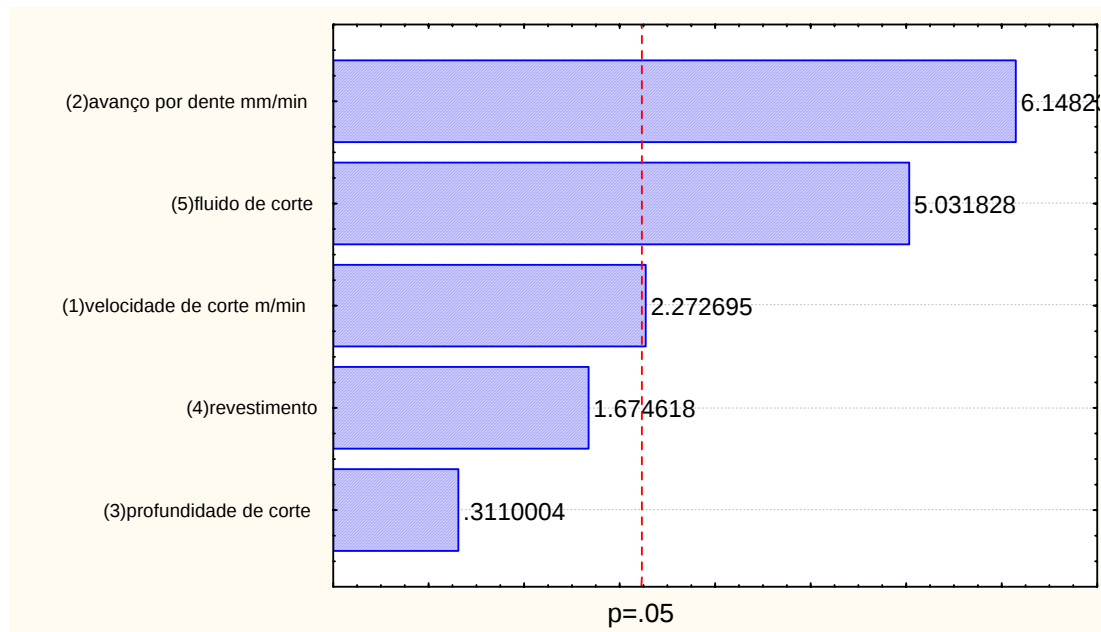


Figura 1 – Gráfico Pareto da variável Ra.

3.6 Etapa 6 – Ensaios de temperatura.

Para se ter uma idéia da quantidade de calor que está se dissipando pela peça e, principalmente, como as variáveis de corte alteram este processo de dissipação de calor, esta etapa foi sugerida como uma atividade importante para justificar os resultados de controle dimensional e acabamento da superfície. Será utilizado um sensor infravermelho marca (Raytek Thermalert TX) para fazer a medição da temperatura do fundo do canal durante o fresamento, numa zona pouco afastada da zona de contato entre o a ferramenta e a peça. O sensor será fixado na máquina-ferramenta com foco direcionado para a peça, em uma região imediatamente posterior ao corte, contrária a direção do avanço.

Um sistema de fixação do sensor será projetado conforme o esquema mostrado na figura 2. Com esta montagem as temperaturas da superfície em usinagem secundária será monitorada quando se variam os principais parâmetros de entrada destacados para os testes da etapa cinco, exceto a utilização de fluido de corte, por limitação do processo de medição empregado.

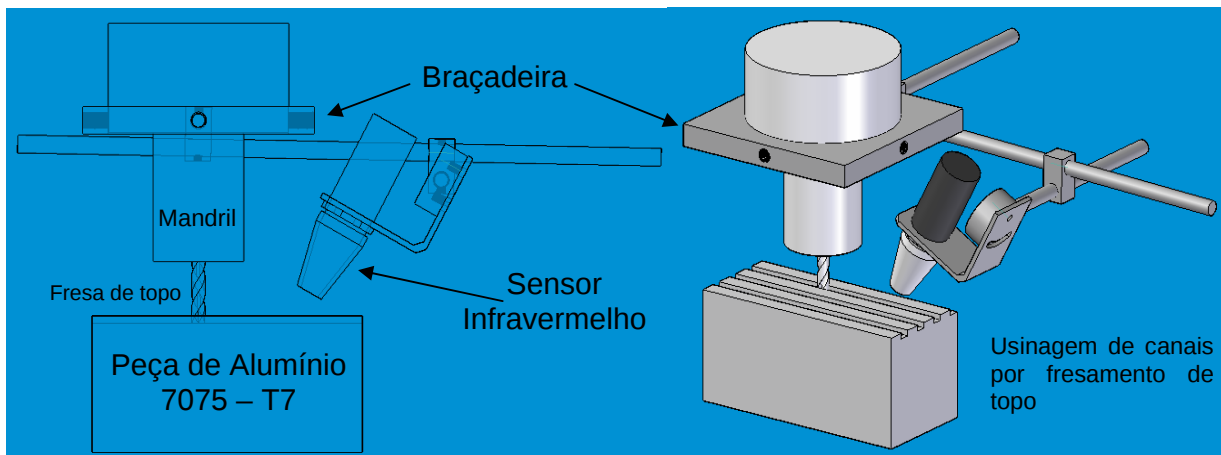


Figura 2 – Esquema ilustrativo da montagem do sensor infra-vermelho para medição da temperatura na superfície recém-usinada da peça.

3.7 Etapa 7 – Análise e discussão dos resultados

Na análise dos resultados serão utilizadas ferramentas estatísticas apropriadas (teste de hipóteses, ANOVA e Superfície de Resposta) para verificar influência de variáveis e seus comportamentos.

Em geral, o que se quer é mostrar com os resultados são as melhoras que se tem na exatidão dimensional e no acabamento da superfície, quando se utilizam os parâmetros de corte mais apropriados. Para tanto, técnicas como ANOVA, para o análise da variância, e modelos de otimização como superfície de resposta, permitem tirar conclusões mais confiáveis dos resultados obtidos.

Os resultados do comportamento dos demais parâmetros de saída, como vibração e potência de corte, além da temperatura medida conforme descrito na etapa seis, serão indicações importantes para ajudar a justificar os resultados do comportamento das variáveis principais em estudo.

3.8 Etapa 8 – Preparação da dissertação e de trabalhos para publicação e defesa

Nesta etapa pretende-se elaborar a dissertação, seguindo regras do COPEM – FEMEC - UFU, e paralelamente preparar artigos para divulgação dos resultados desta pesquisa.

4. CRONOGRAMA

Tabela 4.1. Cronograma

Etapas	Meses*											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												

* O primeiro mês se refere a agosto de 2007

Todos os materiais e equipamentos já se encontram disponíveis exceto as ferramentas, até o momento, as etapas que não precisam das fresas de topo tem sido desenvolvidas com satisfação.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES, CNPq, FAPEMIG, IFM pelo apoio financeiro, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFU, ao Doutor Eder Costa Silva pelo auxílio na execução dos experimentos e na análise dos resultados, as empresas Embraer, OSG e Blasser pelo fornecimento dos materiais e o apoio a pesquisa brasileira.

6. REFERÊNCIAS

CALADO, V., MONTGOMERY, D. C., Planejamento de Experimentos Usando o *Statistica*, Rio de Janeiro: E-Papers Serviços Editoriais, 2003, 260p.

Marcelino, A. P., Domingos, D. C., Campos, D. V. and Schroeter, R. B., “Medição e Simulação dos Esforços de Usinagem no Fresamento de Topo Reto de Ligas de Alumínio Tratável Termicamente 6061”, IX CREEM 2004, Rio de Janeiro, Paper CRE04-PF25.

Machado, A. R. and Da Silva, M.B., “Usinagem dos Metais”, apostila, 8ª versão, EDUFU, Uberlândia, 2004, 257 p.

Weingaertner, W.L., and Schroeter, R.B., “Tecnologia de Usinagem do Alumínio e suas ligas”, 2ª ed, São Paulo: Alcan Alumínio do Brasil, 1991.

DIMENSIONAL ACCURACY AND SURFACE FINISH OF AERONAUTIC ALUMINUM 7075-T7 ON END MILLING PROCESS

Mauro Paipa Suarez

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Av. João Naves de Ávila, 2.121, Uberlândia – MG, 38.408-100, Brasil

mpsuarz@mecanica.ufu.br

Álison Rocha Machado

alisonm@mecanica.ufu.br

Eder Costa Silva

eder@div.cefetmg.br

Abstract: This article aims to present the plane work of the project DIMENSIONAL ACCURACY AND SURFACE FINISH OF AERONAUTIC ALUMINUM 7075-T7 IN END MILLING PROCESS. This work analyze the dimensional accuracy and surface roughness of grooves generated by end milling process changing the conditions of cut (speed of cutting, feed per tooth, axial deep of cut, fluid cut application, distance between grooves, work piece size and overhang). Temperature and vibration analysis will be made to find a relationship between them, the roughness and the dimensional accuracy of the grooves. The first test will be project with a standard experimental design of two levels, through it will be determinate whose variables will have more influence on the response, with these results will be apply a central composite design and a surface response to find the values to get a performed roughness and accuracy. To measured the temperature and vibration will be used a infrared sensor(Raytek Thermalert TX) and an accelerometer (Brüel & Kjær)respectively. This researching pretend to demonstrate how the aluminum has a reduced deformation when is applied HSM (High Speed Machining) like consequence of time reduction for propagation of heat generated in the chip-tool interface.

Keywords: End Milling, axial deep, High Speed Machining, Dimensional Accuracy.