

## **PRECISÃO DIMENSIONAL EM CANAIS USINADOS NA LIGA DE ALUMÍNIO 7075 - T7**

Mauro Paipa Suarez, [juniorpaipa@hotmail.com](mailto:juniorpaipa@hotmail.com)  
Eder Silva Costa, [eder@div.cefetmg.br](mailto:eder@div.cefetmg.br)  
Álison Rocha Machado, [alisonm@mecanica.ufu.br](mailto:alisonm@mecanica.ufu.br)  
Alexandre Mendes Abrão, [abrao@ufmg.br](mailto:abrao@ufmg.br)

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

**Resumo:** *Sabe-se que o calor gerado no processo de usinagem é dissipado pelas partes envolvidas no processo (cavaco, ferramenta, peça e ambiente) e a distribuição da dissipação depende das condições de corte, principalmente da velocidade de corte. A relação entre o calor gerado e o calor dissipado é conhecida como balanço energético. Se o calor dissipado pela peça for menor, possivelmente a deformação da peça por dilatação térmica será igualmente reduzida. O objetivo deste trabalho é avaliar a influência dos parâmetros de corte ( $v_c$ ,  $f_z$ ,  $a_p$ , espaçamento entre os canais e uso de fluido de corte: “Mínima Quantidade de Fluido, SECO e Convencional sobre cabeça”), na precisão dimensional (largura dos canais, medida por uma MMC), em peças de uma liga de alumínio aeronáutico 7075 – T7 (liga de alumínio-zinco tratada termicamente), no processo de fresamento de topo (abertura de canais), usando ferramentas de metal duro. Os testes foram propostos baseando-se em técnicas de planejamento experimental e posteriormente foram avaliadas com quadros de ANOVA com 95% de confiabilidade. Os resultados mostraram que dos parâmetros investigados, apenas os fluidos de corte aplicados na condição MQF e na forma convencional aumentaram a precisão dimensional.*

**Palavras Chave:** *Fresamento de topo, Balanço energético, Precisão dimensional, Mínima Quantidade de Fluido.*

### **1. INTRODUÇÃO**

Na usinagem dos metais a precisão dimensional e o acabamento da superfície são duas características importantes de uma peça fabricada, pois ela vai ser utilizada em diferentes aplicações onde se precisa de ajustes perfeitos, tolerâncias apertadas e acabamentos melhorados. Isto se torna ainda mais significativo quando vidas humanas são envolvidas. Por exemplo, no caso da fabricação de um avião é imperativo que todos os componentes mecânicos estejam funcionando corretamente, sob pena de colocar a vida de pessoas em risco.

Dentre as possíveis variações do processo de fresamento, uma das que possui maior emprego nos setores de ferramentaria atualmente é o fresamento de topo. As fresas de topo possuem arestas cortantes tanto em sua periferia quanto na sua face, realizando, portanto o corte nessas duas regiões, sendo aplicado especialmente na usinagem de grandes volumes de material, por exemplo, na fabricação de partes de aeronaves, moldes e matrizes aonde vem ganhando espaço, substituindo processos tradicionalmente usados, isto graças à sua maior produtividade (Drozda; Wick, 1983 e Stemmer, 1995).

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-ferramenta 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 ( $23 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$  contra  $11 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$  para o aço comum ao carbono). 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.

Estudos recentes mostram a influência da temperatura e a força no erro dimensional. Almeida (2007) estudou o alargamento de furos concluindo que uma guia maior produz mais atrito, o que aumenta a temperatura gerada na

usinagem e piora a qualidade dos furos obtidos. Neste mesmo trabalho encontrou-se melhor qualidade geométrica dos furos nas condições de corte menos severas, onde as forças de usinagem são baixas.

Segundo Sahn, citado por Polli (2005), o aumento de rugosidade é causado pela elevada temperatura na zona de contato entre a peça e o flanco da ferramenta de corte. O material é expulso da área de contato e adere no flanco da ferramenta, resultando em má qualidade da superfície, especialmente quando pequenos ângulos de incidência são empregados.

Na geometria da peça erros de forma são observados devido às deflexões estáticas enquanto os deslocamentos dinâmicos prejudicam o acabamento da superfície (Budak e Altintas, 1994). Para se contornar o problema, costuma-se reduzir a taxa de remoção de material, abdicando-se da potência e torque disponíveis no eixo-árvore.

Na usinagem dos metais quase toda a energia consumida é convertida em calor, que é gerado pela deformação plástica e o atrito na zona de cisalhamento primária e secundária, e eventualmente entre a peça e a superfície de folga da ferramenta. Este calor é afetado pela mudança nos parâmetros de corte, mas principalmente da velocidade de corte. 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 na usinagem como balanço energético. Neste balanço, a fração de calor dissipado para a peça é responsável pelo seu aquecimento e conseqüentemente 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, precisam-se adequar os parâmetros de corte de tal forma que o calor dissipado pela peça diminua, aumentando as parcelas dissipadas pelos demais integrantes do corte. Na equação de balanço energético Eq. (1). Podemos observar que:

$$Q_p = Q_z + Q_{a_1} + Q_{a_2} - Q_c - Q_{ma} - Q_f, \quad (1)$$

Onde,

$Q_p$  = calor dissipado pela peça

$Q_z$  = calor gerado na zona de cisalhamento primário

$Q_{a_1}$  = calor gerado na zona de cisalhamento secundário

$Q_{a_2}$  = calor gerado na zona de interface peça-superfície de folga da ferramenta

$Q_c$  = calor dissipado pelo cavaco

$Q_{ma}$  = calor dissipado pelo meio ambiente

$Q_f$  = calor dissipado pela ferramenta de corte

Ao se aumentar a velocidade de corte, por exemplo, sabe-se que a geração de calor é aumentada proporcionalmente (parcelas  $Q_z$ ,  $Q_{a1}$  e  $Q_{a2}$ ) (Machado e Da Silva, 2004), mas se a parcela de calor que dissipa para os outros elementos, como por exemplo, para o cavaco,  $Q_c$ , e para o meio ambiente,  $Q_{ma}$ , também for aumentada em maiores proporções, para se manter o balanço energético, a parcela de calor que é dissipada pela peça,  $Q_p$ , pode diminuir. Se isto ocorrer, a precisão dimensional das peças usinadas provavelmente será maior.

Este trabalho tem por finalidade estudar o comportamento dimensional de peças de alumínio aeronáutico 7075 – T7, quando usinadas sob diferentes condições de corte (diferentes balanços energéticos). 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 precisão das peças produzidas.

## 2. METODOLOGIA

Foram usinados múltiplos canais em cheio usando corpos de prova de dimensões 400 X 100 X 100 da liga de alumínio 7075-T7. A usinagem dos canais foi realizada com fresas de metal duro inteiriças de 10 mm de diâmetro, utilizando diferentes condições de corte.

### 2.1. Inspeção Dimensional

Para caracterizar a precisão dos canais usou-se uma MMC (máquina de medir por coordenadas) TESA 3000 com resolução de 0,001 mm. A Figura 1 mostra um detalhe da máquina de medir por coordenadas utilizada nas medições das larguras dos canais.

Uma pequena ampliação detalha melhor o apalpador de rubi de 1 mm de raio. O valor da largura do canal de cada condição de corte considerado representa a média de quinze medidas (5 medidas eqüidistantes em cada canal e três canais para cada condição de corte).

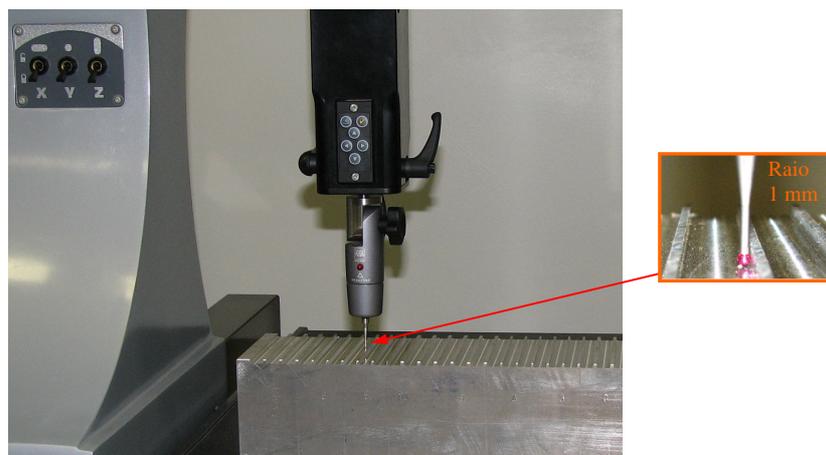


Figura 1. Medição da largura dos canais usando uma máquina de medir por coordenadas.

## 2.2. Material da Peça e Ferramentas

Para este trabalho foram usadas 4 barras de alumínio aeronáutico 7075-T7 com seção transversal de 100X100 mm e comprimento de 400 mm. Este tipo de material tem a mesma classificação que o material usado por Polli (2005), e Balkrishna e Yung (2001), em testes de usinagem com altíssimas velocidades de corte. Seus componentes principais são Zn, Cu e Mg em menor teor. Estes elementos conferem uma excelente resistência mecânica e usinabilidade melhorada com cavacos quebradiços que permitem condições de corte mais severas, sem empastamento do material na fresa. A Tabela 1 apresenta a composição da liga 7075 segundo a classificação normalizada pela Aluminium Association.

Tabela 1. Composição da liga de alumínio 7075 (Weingaertner e Schroeter, 1991).

LIGA	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn	Cr	outros		
									cada	total	
7075	Max	2,0	0,5	2,9	0,3	0,4	0,2	6,1	0,28	0,05	0,15
	Min	1,2		2,1				5,1	0,18		
<b>Dureza Brinell</b>									150		

A Tabela 2 relaciona algumas propriedades da liga 7075-T7 tratada termicamente por um processo de solubilização e estabilização (superenvelhecida).

Tabela 2. Propriedades mecânicas típicas da liga 7075 -T7 (Weingaertner e Schroeter, 1991).

Liga	Tempera	Resistência à tração [MPa]	Limite de escoamento [MPa]	Alongamento em 50 mm	Dureza HB	Resistência ao cisalhamento [MPa]
7075	T7	570	505	11	150	330

Tentando isolar o efeito da temperatura na precisão dimensional, antes de começar os testes, o material foi faceado em todos os seus lados e fixado na mesa da fresadora CNC em seis pontos distribuídos ao longo da peça, pois um desvio na fixação da mesma será projetado no corte. A Figura 2 apresenta um desenho esquemático da distribuição dos canais de 10 mm de largura nominal usinados no corpo de prova, indicando o método usado para as duas repetições que foram realizadas para cada teste.

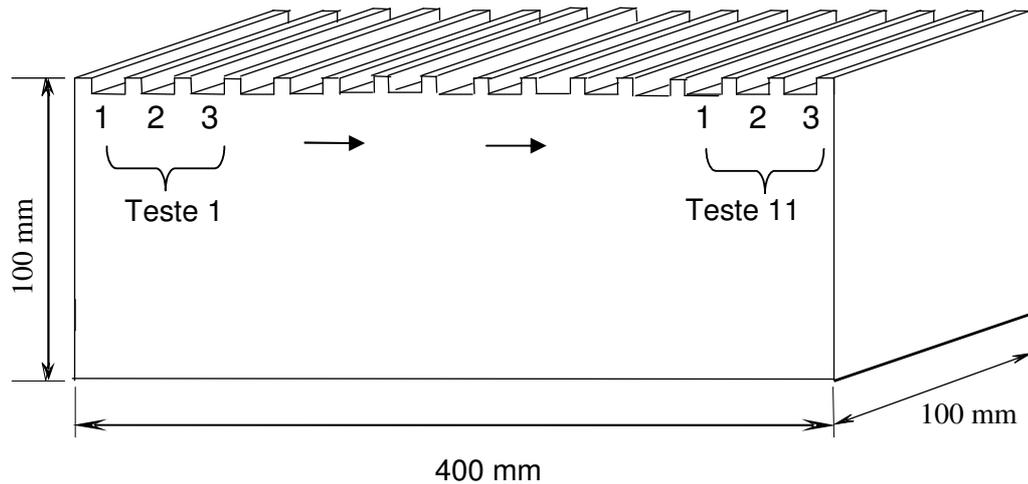


Figura 2. Desenho esquemático do corpo de prova de alumínio.

As ferramentas utilizadas nestes ensaios foram fresas de topo inteiriças de metal duro da classe K10 com duas arestas de corte e raio de ponta de 0,5 mm com afiação indicada para corte de alumínio. Estas ferramentas foram fornecidas pela OSG Tungaloy Sulamericana de Ferramentas Ltda. A Figura 3 apresenta foto cotada de uma fresa de topo utilizada. Apesar do diâmetro nominal ser de 10mm, o diâmetro real foi medido usando uma máquina de Abbé com resolução de 0,2  $\mu\text{m}$ , o diâmetro encontrado foi 9,9418  $\pm 0,004$  mm. Esta medida real se faz necessária devido à variações dimensionais na largura dos canais na casa de micron.

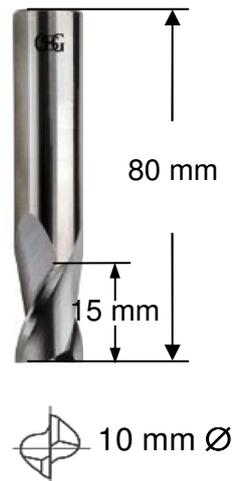


Figura 3. Fresa de topo maciça de metal duro utilizada nos ensaios.

### 2.3. Planejamento Experimental

Os testes foram formulados usando um planejamento fracionário  $2^{5-1}$ . Os níveis foram propostos baseando-se no Machining Data HandBook (1980), Weingaertner e Schroeter (1991) e as recomendações do fabricante das ferramentas. A Tabela 3 mostra os valores usados para cada variável.

Tabela 3. Níveis das variáveis de corte da primeira etapa.

Níveis	-1	+1	Unidades
Velocidade de corte	70	265	(m/min)
Avanço por revolução	0,05	0,12	(mm/rev)
Profundidade de corte	2	4	(mm)
Espaçamento entre canais	1.5	2.5	(mm)
Sistema lubri-refrigerante	Seco	MQF	Jorro

### 3. Resultados e Discussões

Após os ensaios, os resultados alimentaram o software Statística 6.0<sup>®</sup> para análise.

#### 3.1. Desvio Dimensional

O fresamento de topo em cheio com uma fresa de  $9,9418^{\pm 0,004}$  mm de diâmetro real, deveria produzir canais de largura igual caso fatores como o batimento do conjunto mandril-pinça-ferramenta, as recuperações elásticas e plásticas e as deformações por dilatação ou contração da peça não influenciassem no processo. Com estas influências, diferenças consideráveis foram observadas e estas dependem das condições de corte. Análise de variância (ANOVA) demonstrou que, para 95% de confiabilidade, a única variável influente positivamente (maior precisão dimensional) foi a presença do fluido de corte na forma de MQF e Jorro.

A Tabela 4 mostra as tendências do desvio dimensional quando se aumenta as variáveis em dois níveis de grandeza (nível -1 para nível +1). Os valores apresentados nas duas ultimas colunas são médias dos testes realizados em cada um destes níveis.

**Tabela 4. Tendências do desvio dimensional em porcentagem quando se passa do Nível -1, para o Nível +1.**

Variáveis testadas	Efeitos	Nível -1 9,9XX (mm)	Nível +1 9,9XX (mm)
(1) $v_c$ (70 → 265 m/min)	↑ 19,2%	83	99
(2) $f$ (0,05 → 0,12 mm/ver)	↑ 3,52%	85	88
(3) Esp. canais (1,5 → 2,5 mm)	↑ 4,76%	84	88
(4) $a_p$ (2,0 → 4,0 mm)	↑ 1,16%	86	87
(5) Sist. Lub./Refrigerante			
(Seco/MQF)	↓ 6,74%	89	83
(Seco/Jorro)	↓ 5,61%	89	84

Nota. As setas ↑ e ↓ indicam afastamento ou proximidade ao diâmetro real da fresa respectivamente quando comparado com o nível inferior da variável analisada.

Contrario ao esperado, o aumento na velocidade de corte de 70 para 265 m/min não conseguiu aproximar a largura do canal ao valor ideal, provavelmente foram predominantes os aumentos na vibração gerando instabilidade no corte. pois, sabe-se que ao aumentá-la a temperatura na zona de corte aumenta proporcionalmente (Dewes et al, 1997). Quando a velocidade de corte foi de 70 para 265 m/min a precisão dos canais diminuiu em 19%.

O comportamento encontrado no aumento do avanço por volta foi similar ao da velocidade de corte, muito embora o tempo de contato das fontes de calor com a superfície usinada fosse menor (maior velocidade de avanço). Os canais apresentaram larguras maiores quando se passou de 0,05 para 0,12 mm/volta, atribuindo-se este aumento às maiores áreas nas zonas de cisalhamento primária e secundária, aumentando assim as áreas de contato entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta (Machado e Da Silva, 2004), incrementando a força de corte de maneira proporcional e consequentemente as deformações e vibrações do sistema.

A influência do espaçamento entre canais, contrario ao esperado, apresentou maiores desvios quando se aumentou a espessura das paredes. Teoricamente maiores volumes de material teriam uma maior capacidade de dissipação do calor, e os resultados mostraram que as paredes mais finas apresentaram menores desvios. Argumenta-se que possivelmente a aplicação de fluidos de corte podem refrigerar de uma maneira mais efetiva paredes de menor espessura, mantendo assim menores deformações por dilatação e possíveis recuperações elásticas do material da peça. A vibração do sistema também é uma variável que pode estar direcionando a estes resultados.

O aumento das profundidades de corte apresentou a menor influência, porém, esperava-se um incremento do desvio dimensional devido às forças de corte maiores, e maior dificuldade na penetração dos fluidos que lubrificam o contato.

Como foi citado anteriormente a variável que apresentou resultados positivos na precisão dimensional foi o uso de fluidos de corte, onde a aplicação de MQF e Jorro melhorou a precisão em 6,7 e 5,6% respectivamente.

O gráfico da Fig. 4 mostra a média aritmética da largura dos canais nas condições a seco, com aplicação de fluido na forma de MQF e na forma de Jorro. A menor largura no gráfico é o diâmetro real da ferramenta (9,9418) mm e a faixa sombreada em azul representa o valor do batimento do conjunto pinça - porta-pinça - ferramenta, medido. Usando um relógio comparador posicionado perpendicularmente ao eixo e deslocado entre as pontas da ferramenta.

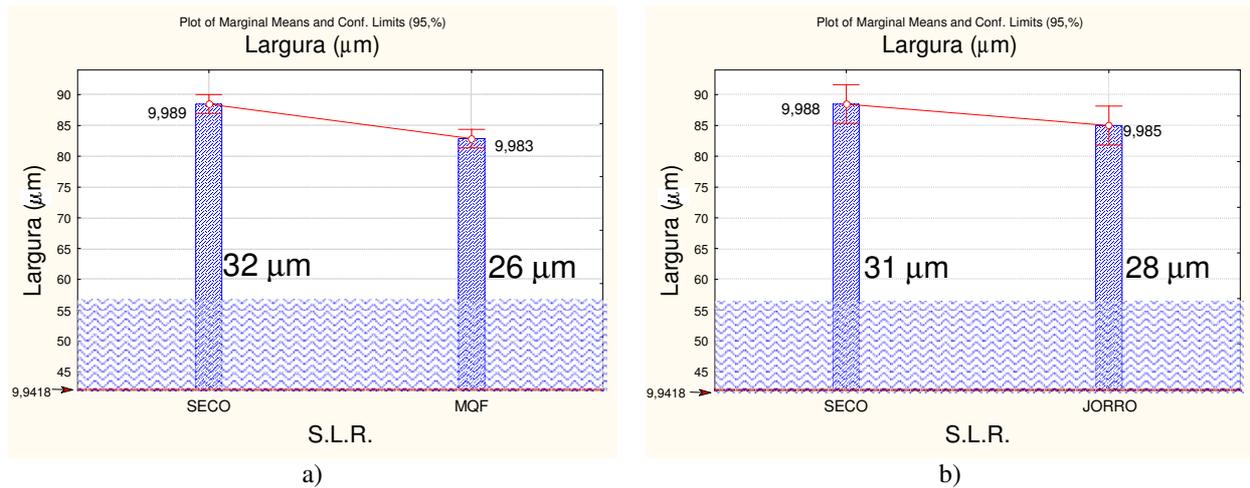


Figura 4. Média aritmética da largura dos canais a) Seco/MQF e b) Seco/Jorro.

Com relação aos fluidos de corte, pelos resultados encontrados pode-se concluir que a ação lubrificante é mais importante que a ação refrigerante, para gerar peças mais precisas. A aplicação do fluido de corte na forma de jorro teve uma tendência positiva na precisão do corte quando comparado com o corte a seco. O uso de fluido na forma convencional apresentou desvantagens frente ao uso de MQF, provavelmente a maior ação refrigerante do jorro manteve refrigerado o material, conservando sua resistência, gerando maiores forças de corte e conseqüentemente maiores deflexões e vibrações do sistema. A aplicação tipo MQF pelo contrário mostrou suas vantagens provavelmente lubrificando a zona de corte, diminuindo as áreas de contato entre o cavaco e a ferramenta implicando em menores forças de corte, ou seja, facilitando o corte diminuindo os desvios dimensionais.

#### 4. AGRADECIMENTOS

Os pesquisadores que desenvolveram esta pesquisa agradecem à CAPES, à UFMG pela disposição dos seus laboratórios, e às empresas EMBRAER, BLASER Brasil e OSG Tungaloy, pelo fornecimento dos materiais, fluidos e ferramentas respectivamente.

#### 5. CONCLUSÕES

- A utilização de fluido de corte foi a única variável que diminuiu o desvio dimensional quando comparado com a condição a seco. Nestes experimentos a maior ação lubrificante contribuiu possivelmente na diminuição das forças de corte e, conseqüentemente, nas vibrações geradas no corte, resultando em uma precisão melhor.
- A tentativa de melhorar a precisão do corte diminuindo a temperatura da peça ao incrementar a velocidade de avanço, não apresentou canais de maior qualidade, pelo contrário as larguras dos canais foram maiores com o incremento da velocidade de corte e do avanço por revolução, provavelmente influenciado pela estabilidade do corte.
- A utilização de MQF diminuiu o desvio dimensional em maior proporção quando comparado com a condição a seco e com jorro. É provável que a maior ação lubrificante tenha contribuído na diminuição das forças de corte e, conseqüentemente, melhorou a estabilidade do corte, resultando numa maior precisão.
- A utilização de fluido aplicado na forma convencional diminuiu o desvio dimensional quando comparado com a condição a seco, mas, apresentou desvantagens quando comparado com o uso de MQF, provavelmente a maior ação refrigerante do jorro manteve refrigerado o material, conservando sua resistência mecânica.
- A profundidade de corte apresentou pouca influência na precisão dimensional do canal, sugerindo-a como boa opção quando se quer incrementar o volume de material usinado.

## 6. REFERÊNCIAS

- Almeida, D. O. Investigação de Desvios Geométricos no Alargamento de Ferro Fundido com Ferramentas Revestidas. 2008. 103p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia
- Balkrishna R., Yung C. S., *Analysis on high-speed face-milling of 7075-T6 aluminum using carbide and diamond cutters*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, V 41, University, West Lafayette, IN 47907, USA, 2001. p 1763–1781
- Budak, E; Altintas, Y. Peripheral Milling Conditions for Improved Dimensional Accuracy. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 34, n. 7, p. 907-918, 1994.
- Dewes, R. C. E Aspinwall, D. K., A, Review Of Ultra High Speed Milling Of Hardened Steels, Journal Of Materials And Processing Technology, N. 69, 1997. p. 1-17.
- Drozda, T. J. And Wick, C., Tool and Manufacturing Engineers Handbook – Machining, n. 4. v.1. Dearborn: Society of Manufacturing Engineers, 1983. p. 1.1-1.66, p. 10.1-10.76.
- Machado, A.R., Da Silva, M.B., Usinagem dos Metais, apostila, 8ª versão, EDUFU, Uberlândia, 2004, 257 p.
- Polli, M. L., Análise da estabilidade dinâmica do processo de fresamento a altas Velocidades de corte, 2005. 214 f., Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC.
- Stemmer, C. E., Ferramentas de corte II, 2º ed., Editora de la UFSC, 1995. 314 p.
- Weingaertner W.L., Schroeter R.B., Tecnologia de Usinagem do Alumínio e suas ligas, 2ª ed, São Paulo: Alcan Alumínio do Brasil, 1991.

## 7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

# DIMENSIONAL ACCURACY OF SLOTS MACHINED IN AEROSPACE ALUMINIUM ALLOY 7075-T7

Mauro Paipa Suarez, [juniropaipa@hotmail.com](mailto:juniropaipa@hotmail.com)

Eder Silva Costa, [eder@div.cefetmg.br](mailto:eder@div.cefetmg.br)

Álison Rocha Machado, [alissonm@mecanica.ufu.br](mailto:alissonm@mecanica.ufu.br)

Alexandre Mendes Abrão, [abrao@ufmg.br](mailto:abrao@ufmg.br)

Federal University Of Uberlândia, Faculty Of Mechanical Engineering, Av. João Naves de Ávila, 2.121, Uberlândia-MG, 38.408-100, Brazil.

**Abstract:** *The heat generated during machining is dissipated through the parts involved (chip, tool, workpiece and atmosphere) and the distribution depends on the cutting conditions, mainly on the cutting speed. The relationship between the heat generated and dissipated is known as energetic balance. If the heat dissipated through the workpiece is reduced, the thermal expansion coefficient will also be diminished and therefore the dimensional accuracy will be higher. The main objective of the present work is to evaluate the influence of the cutting parameters ( $v_c$ ,  $f_z$ ,  $a_p$ , distance among the slots opened and the cutting fluids: “Minimal Quantity of Liquid, Dry and overhead flood cooling”) on the dimensional accuracy (thickness of the slots measured by a CMM) of 7075 – T7 aerospace aluminium alloy workpieces (heat treated Al-Zn alloy) when end milling small slots with integral cemented carbide tools. The experimental tests were carried out following a Design of Experiment (DOE) and the results were based on Variance Analysis Technique (ANOVA) with 95% of confidence. The results showed that among the in-put variables only the cutting fluid applied in the MQL and conventional manner improved the dimensional accuracy.*

**Key Words:** *End milling, Dimensional accuracy, Energy balance, Minimal Quantity of Lubricant.*