

INFLUÊNCIA DOS ÂNGULOS DE INCLINAÇÃO DA FERRAMENTA NA RUGOSIDADE SUPERFICIAL EM USINAGEM DE 5 EIXOS SIMULTÂNEOS

Jeferson Aparecido Sperlick, sperlick.engenharia@outlook.com.br¹

Hugo Sakai Idagawa, hugo.sakai@sp.senai.br¹

Roberto Giani Pattaro Junior, roberto.gjunior@sp.senai.br¹

¹Faculdade de Tecnologia Senai “Roberto Mange”, Rua Pastor Cícero Canuto de Lima, 71. São Bernardo. Capinas/SP. CEP 13036-210

Resumo. A forte competitividade entre as empresas vem forçando a otimização dos processos produtivos, levando a redução de custos do processo de fabricação. Assim, as empresas do ramo da metalmeccânica vêm buscando a otimização do processo de usinagem, reduzindo o tempo de entrega de produto, assegurando sua qualidade e redução nos custos. Empresas do setor aeroespacial e de moldes e matrizes têm por característica produtos de alta complexidade e baixa demanda. Geralmente esses produtos apresentam geometria complexa onde só é possível sua fabricação em um centro de usinagem com recurso de três, quatro ou cinco eixos, pois as exigências das características do projeto também estão cada vez mais elevadas. Foram realizados ensaios, mantendo o Tilt Angle à 25° e variando o Lead Angle em 0, -15, -60, 15 e 60 graus. O material utilizado nos experimentos foi o aço AISI D6 em seu estado de fornecimento, sendo usinado com ferramenta de ponta esférica, com o objetivo de avaliar a influência do Lead Angle na rugosidade superficial. A principal conclusão é que variando apenas o ângulo de contato entre ferramenta e peça, Lead Angle, gerou forte influência na qualidade superficial da peça, principalmente quando se trata de usinagem em cinco eixos, tendo uma variação entre os ensaios de até 373%.

Palavras-chave: ângulo de ligação, ângulo de inclinação, fresamento em 5 eixos.

Abstract. The strong competition between companies has been forcing the optimization of production processes, reducing the reduction of manufacturing. Thus seeking the optimization of the machining process, as companies, the delivery time of product reduction ensuring its quality and cost reduction. Companies in the aerospace and molds and dies sector are characterized by products of high complexity and low demand. These are the only products, they are complex where their manufacture is possible in a machining center or five axes, as the requirements of the project characteristics are also increasingly high. Tests were performed, keeping the Tilt Angle at 25° and varying the Lead Angle at 0, -15, -60, 15 and 60 degrees. The material used in the experiments was AISI D6 in its state of supply, being machined with a spherical tip tool, in order to evaluate the influence of Lead Angle on the surface roughness. The main conclusion is the contact axis that varies only the tool and part design, Lead Angle, generated a strong influence on the surface quality of the part, especially when it comes to machining in five, with a variation only between the tests of up to 373%.

Keywords: lead angle, tilt angle, 5 axis milling

1. INTRODUÇÃO

As empresas nos últimos anos vêm enfrentando uma forte ameaça quanto a sua sobrevivência. Essas ameaças estão principalmente ligadas à competitividade que reflete diretamente em ações internas visando a redução de custos dos processos de fabricação.

Dentre várias empresas do ramo metalmeccânica, destaca-se com uma necessidade maior de otimização dos processos, as empresas de fabricação de moldes e matrizes além da fabricação de componentes usinados para indústria aeroespacial. O que essas empresas têm em comum é a alta complexidade e baixa demanda dos seus produtos.

Sendo assim, as empresas vêm buscando a otimização de processos através de novas tecnologias e métodos inovadores com o intuito de reduzir o tempo de entrega do produto e aprimorando sua qualidade, gerando por consequência, uma redução nos custos.

Contudo, no processo de fabricação de moldes e matrizes e produtos para a indústria aeroespacial geralmente envolvendo geometrias complexas, só é possível com o auxílio de uma máquina chamada de centro de usinagem, com

recursos de movimentação de três ou cinco eixos, garantindo assim as tolerâncias dimensionais e geométricas além da rugosidade superficial, principalmente em moldes ou matrizes, que são fatores altamente impactantes na qualidade final e vida útil do produto.

O objetivo deste trabalho é usinar faces com cinco ângulos diferentes de inclinação, variando assim o diâmetro efetivo na usinagem, realizar medições da rugosidade e analisar a influência do contato entre a ferramenta e a peça nas condições da superfície usinada e da região de contato da ferramenta.

O presente trabalho tem como base teórica uma revisão bibliográfica baseada em teses, dissertações e livros além de experimentos práticos realizados em laboratório de usinagem.

1.1. Fresamento

O processo de fresamento, de acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2014) se caracteriza por:

- A ferramenta, denominada fresa, é provida de arestas cortantes dispostas simetricamente em torno de um eixo;
- O movimento de corte da ferramenta é proporcionado pela rotação da fresa ao redor de seu eixo e;
- O movimento de avanço da ferramenta é geralmente feito pela própria peça em usinagem, que está fixada na mesa da máquina, a qual obriga a peça a passar sob a ferramenta em rotação, que lhe dá forma e dimensão desejadas.

Ainda de acordo com o autor, há dois tipos fundamentais de fresamento, podem ser classificados sob a orientação do eixo-árvore da máquina, sendo horizontal (quando o eixo-árvore está na posição horizontal) e vertical, ou ainda em raros casos, o inclinado:

a) Fresamento Frontal: operações nas quais os dentes ativos da fresa estão na superfície frontal da ferramenta, sendo assim, o eixo da fresa é perpendicular à superfície gerada.

b) Fresamento Tangencial: operações nas quais os dentes ativos estão na superfície cilíndrica da ferramenta, sendo assim, o eixo da fresa é paralelo à superfície que está sendo gerada. Dentro desta classificação o fresamento apresenta ainda mais duas características importantes: o fresamento concordante, que se dá pela concordância do movimento de rotação da ferramenta e avanço da mesa da máquina, que resulta em cavaco em forma de vírgula, onde a maior espessura do cavaco se dá no início do contato da ferramenta com a superfície usinada, decrescendo até zero. O fresamento discordante, que se dá pela discordância dos movimentos de rotação e avanço, ou seja, o movimento de avanço da mesa é contrário ao movimento de rotação da ferramenta, que também gera cavaco em forma de virgula, porém de forma contrária ao do fresamento concordante, onde o cavaco tem sua menor espessura na entrada da aresta cortante na superfície da peça e seu valor máximo na saída desta aresta ao usinar a superfície.

1.2. Processo de Fresamento em 5 Eixos

Os centros de usinagem de cinco eixos oferecem 3 eixos de translação e 2 eixos de rotação movimento entre a ferramenta e a peça, ou seja, além dos três eixos de translação oferecidos em centros de usinagem de três eixos (convencionais), são adicionados mais dois eixos de rotação, que podem girar em torno dos eixos X, Y ou Z, que podem ser nomeados como eixo "A", "B" ou "C", onde que o eixo rotativo "A" gira em torno do eixo de translação "X", o eixo rotação "B" gira em torno de "Y" o eixo de rotação "C" gira em torno de "Z". (Souza, 2006).

Os centros de usinagem podem apresentar três tipos básicos em função dos eixos de rotação, como demonstrado na Fig. 1:

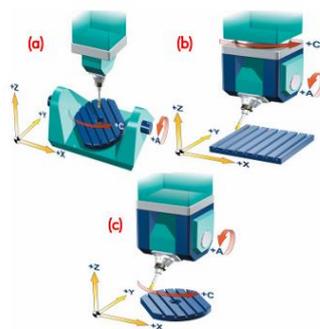


Figura 1. Tipos básicos de centro de usinagem com 5 eixos (Souza, 2006)

Os centros de usinagem da figura 4a apresenta uma maior rigidez da ferramenta e uma maior precisão na usinagem de contornos ou formas circulares em torno do eixo C. Não é recomendado para usinagem de peças de grande porte, pois tem a necessidade de um elevado torque para inclinar e rotacionar os eixos de rotação. Amplamente utilizado em usinagem de peças de pequeno e médio porte do setor aeronáutico (Souza, 2006).

Para a usinagem de peças de grande porte e em moldes e matrizes a configuração (b) é a mais utilizada, uma vez que a mesa não realiza os movimentos de rotação adicionais, sendo estes localizados no *spindle*, fragilizando a rigidez no fuso

onde a ferramenta está situada. As máquinas do tipo (c) são as menos comuns, onde o eixo de rotação “C” está localizado na mesa, favorecendo a usinagem de peças com perfil cilíndricos, como furos inclinados (Souza, 2006).

Em usinagem com o recurso de cinco eixos aumenta-se a flexibilidade de acesso da ferramenta em regiões que seriam impossíveis de usinar com um centro de usinagem com 3 eixos, a execução de detalhes em orientações diversas juntamente com a redução do balanço da ferramenta (relação entre comprimento e diâmetro da ferramenta) para a usinagem de cavidades, por exemplo, faz com que a usinagem fique mais estável. Outro fator importante é uma maior precisão do contorno da peça, fazendo o uso de ferramentas de topo reto e toroidal (com raio de canto), diminuindo o número de passes, melhorando o ajuste entre o contato ferramenta-peça, proporcionando melhora na qualidade da superfície usinada e redução do tempo de ciclo de usinagem (Souza, 2006).

Para definição do processo de usinagem em 5 eixos, estas estratégias devem conter no mínimo duas etapas, assim como no processo de fresamento feito em máquinas com 3 eixos: Desbaste e acabamento.

De acordo com Souza (2011), na primeira etapa (desbaste) prevalece a maior remoção de material com tempo e custos mínimos, visando maximizar a relação custo-benefício e geralmente em estratégias de desbaste utiliza-se o conceito de quinto eixo posicionado conhecido como fresamento 3+2, que consiste em um determinado posicionamento no 4° e 5° eixo e a partir deste é feito a usinagem nas superfícies que abrangem este posicionamento, levando em consideração os limites da ferramenta e máquina.

A última etapa é o acabamento, operação pela qual busca o atendimento aos requisitos do projeto, tais como tolerâncias dimensionais, relações geométricas e de forma e rugosidade superficial. Dessa forma, entre as etapas de desbaste e acabamento pode ter um re-desbaste, buscando a otimização do processo e um pré-acabamento, visando manter um sobremetal uniforme para posterior operação de acabamento, a fim de garantir estabilidades e esforços constantes (Souza, 2011).

Segundo Pattaro Jr (2019), o processo de fresagem em 5 eixos simultâneos é aplicado predominantemente como uma operação de acabamento. De acordo com o autor, são raras as publicações que tratam de operações de desbaste com este tipo de recurso.

Outra vantagem atribuída a este processo é a variação dos ângulos de inclinação da ferramenta sobre a superfície que no fresamento com 5 eixos é possível fazer os controles destes ângulos, otimizando a forma de contato entre ferramenta e peça (Miralles, 2009).

Recentemente, Kull Neto (2016) citou que tal variação dos ângulos de inclinação são chamados de *tilt angle* e *lead angle* que são definidos em relação ao sistema de coordenadas do processo de usinagem, composto pela direção de avanço (F), direção perpendicular ao avanço (C) e direção normal à superfície (N), conforme a Fig. 2.

O *lead angle* é definido como o ângulo de rotação em torno do eixo C , que é medido em relação ao eixo N , sendo positivo em direção ao avanço da ferramenta; e o *tilt angle* é definido como o ângulo de rotação em torno do eixo F , medido em relação ao eixo N , sendo positivo em direção ao incremento de a_e (Kull Neto, 2016).

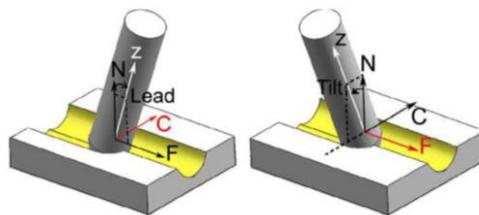


Figura 2. Lead Angle e Tilt Angle (Kull Neto, 2016)

O método acima é conhecido como Método da Ferramenta Inclinada, sendo o mais antigo de todos e o mais difundido para fresamento em 5 eixos simultâneos (Souza, 2011).

Este método consiste em orientar a ferramenta com uma inclinação constante de seu eixo em relação ao vetor normal local da superfície. Dois ângulos podem ser definidos pelo programador, um é o ângulo de avanço β , na direção do avanço da ferramenta e o ângulo de ataque α , transversal à direção de avanço.

Abaixo, a Fig. 3 mostra o método de orientação da ferramenta, fazendo com que os vetores convirjam ou divergem em relação a um ponto ou uma linha, sendo estes pontos focais definidos pelo programador.

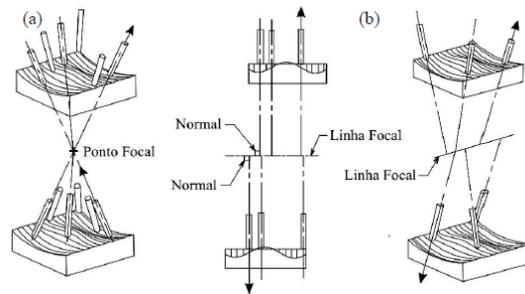


Figura 3. Orientação da ferramenta, partindo de um ponto focal (a) ou de uma linha focal (b) (Souza, 2011)

Conforme a Fig. 4, Souza (2011) relata que a melhor condição para seu experimento foi de *Tilt Angle* 70° e *Lead Angle* de 5° . A justificativa que o autor dá para o elevado *tilt angle* é a acessibilidade da ferramenta para usinar as superfícies da turbina.

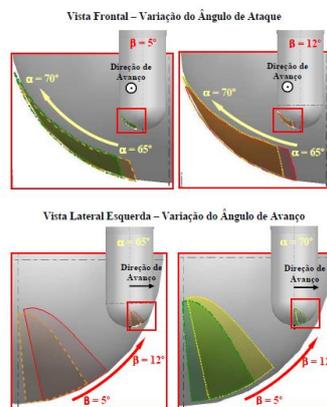


Figura 4. Variação da zona de engajamento em função da variação do Tilt (α) e Lead Angle (β) (Souza, 2011)

De acordo com Ozturk, Tunc e Budak (2009), os ângulos de aproximação (*lead*) e inclinação (*tilt*) afetam diferentes fatores como a forma de contato da ponta da ferramenta em relação a peça, a altura de crista, erros de forma, estabilidade e forças de corte. Na Fig. 5 nota-se a influência dos ângulos de inclinação da ferramenta na altura da crista. Quando as combinações de configurações do passo lateral com a inclinação da ferramenta resultarem na crista ainda sendo formada pelo raio da ferramenta (a), a inclinação não influencia o acabamento, porém, ao ultrapassar o contato da crista com o raio da ferramenta é possível ocorrer a variação da crista na usinagem (b).

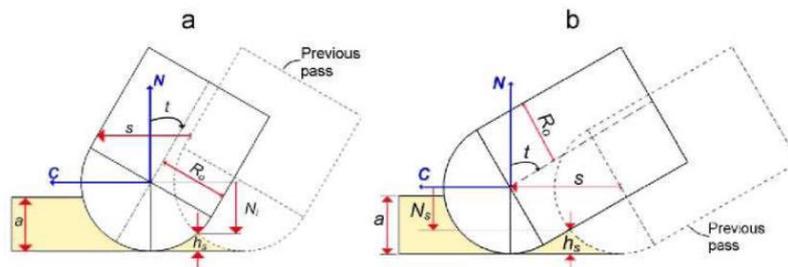


Figura 5. Influência dos ângulos sobre a altura de crista (Ozturk, Tunc e Budak, 2009)

2. METODOLOGIA

A geometria do corpo de prova à ser usinado que será objeto de estudo neste artigo contém superfícies complexas que faz jus ao uso de estratégias de usinagem de 5 eixos. Sua geometria assemelha-se ao de uma aleta de turbina, contendo superfícies complexas e sua aplicação na indústria é ampla. O material do corpo de provas é o SAE D6.

Segue abaixo a Fig. 6 que demonstra o dimensional e demonstra a geometria da peça.

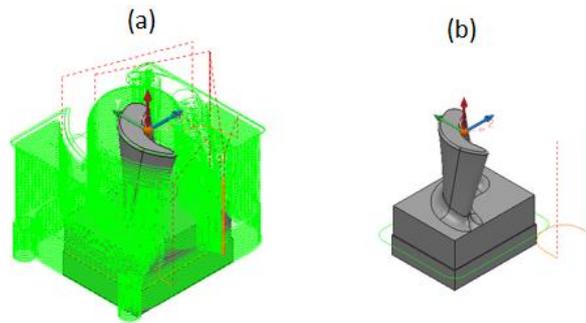


Figura 8. Estratégia de desbaste do modelo (a) e perfil de curva (b)

Os parâmetros de corte e a descrição das ferramentas utilizadas nas estratégias citadas foram apontados na Tab. 1.

Tabela 1. Descrição de ferramenta e parâmetros de corte

Estratégia	Ferramenta	v_c (m/min)	f_z (mm/rot)	a_e (mm)	a_p (mm)
Desbaste de Modelo	Fresa toroidal APKT Ø20	150	0,25	14	0,5
Perfil de Curva	Fresa de Metal Duro Ø12	70	0,05	-	-

Para as estratégias de pré-acabamento e acabamento, foram utilizadas duas fresas esféricas inteiriças de metal duro com 10 milímetros de diâmetro. As estratégias e os parâmetros de corte seguem abaixo na Tab. 2. A máquina utilizada foi a Hardinge XR600 5AX equipada com comando Heidenhain, com 5 eixos.

A fixação da peça foi através de morsa, cuja região de fixação foi situada em sua base. Houve a necessidade de inserir espaçadores na morsa, sendo que o motivo pelo qual foram utilizados foi para evitar o limite físico do eixo “Z” da máquina, ao usinar determinadas regiões do corpo de prova.

Tabela 2. Descrição de ferramenta e parâmetros de corte

Estratégia	Ferramenta	v_c (m/min)	f_z (mm/rot)	a_e (mm)	a_p (mm)
Swarf	Fresa Esférica MD Ø10°	80	0,1	-	2
Perfil de Curva	Fresa Esférica MD Ø10	70	0,08	0,35	-

Quanto aos ângulos de inclinação seguiu-se de acordo com outros trabalhos, onde foram adotados os ângulos 15° / -15° / 60° / -60° para o *Lead* (ângulo da direção de avanço), próximos aos limites de segurança contra colisão entre suporte de ferramenta e peça e 25° para o ângulo de *Tilt* (ângulo de Ataque, perpendicular à direção de avanço).

2.3. Método de Medição

Para realizar a medição dos corpos de prova, foi utilizado o rugosímetro do fabricante MAHR, modelo M300C. O valor de cut-off utilizado foi de 4mm, conforme norma ISO 4288-1996. A região do corpo de prova para determinar a rugosidade superficial foi a mesma para todos os corpos de prova, conforme mostra a Fig. 9.

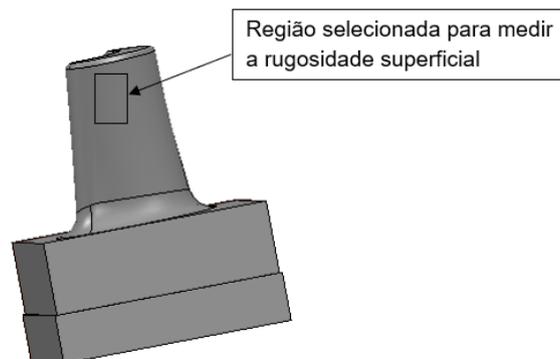


Figura 9. Região para medição da rugosidade superficial

Esta região foi escolhida porque possui maior estabilidade e melhor acesso do equipamento durante a medição e não possui regiões de transição entre superfícies, portanto, possui uma superfície constante e estável.

3. RESULTADOS

Seguem abaixo a Tab. 3 com os resultados obtidos com os respectivos ângulos de *Lead* estudados neste trabalho:

Tabela 3. Resultados de acordo com cada Lead Angle

Corpo de prova	Ângulo (Graus)	Rugosidade (Ra)
1	0°	2,554
2	0°	2,452
Corpo de prova	Ângulo (Graus)	Rugosidade (Ra)
1	15°	2,122
2	15°	2,022
Corpo de prova	Ângulo (Graus)	Rugosidade (Ra)
1	60°	1,554
2	60°	1,501
Corpo de prova	Ângulo (Graus)	Rugosidade (Ra)
1	-15°	1,258
2	-15°	1,260
Corpo de prova	Ângulo (Graus)	Rugosidade (Ra)
1	-60°	0,683
2	-60°	0,685

De acordo com os resultados obtidos, o maior valor de rugosidade superficial foi encontrado quando o valor do ângulo de Lead estava em 0°, o que condiz com a literatura, pois nesta situação a superfície está sendo usinada com o centro da ferramenta. Dessa forma, como a velocidade de corte nesta região tende à zero, há uma grande geração de esforços sobre a ferramenta e a superfície usinada, piorando assim a qualidade da superfície usinada.

O menor valor de rugosidade superficial foi encontrado onde o ângulo de Lead estava em -60°. Abaixo segue Fig. 10 com gráfico comparativo com todas as medições realizadas.

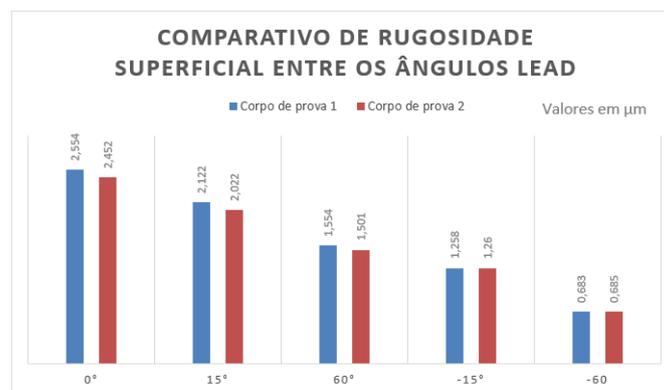


Figura 10. Gráfico comparativo de rugosidade superficial

Conforme previsto e explicado acima, o valor de orientação da ferramenta à 0° foi o maior valor de rugosidade superficial encontrado em todas as amostras. O que chamou a atenção nestes experimentos foi que variando a posição da ferramenta de -15 graus para 15 graus e de -60 graus para 60 graus, houve uma considerável diferença entre os valores. Esta situação ocorre porque a região de contato com a ferramenta varia em função da posição da ferramenta em relação ao sobremetal. Quando o ângulo possui valor positivo (15° e 60°) a região de contato da ferramenta com a peça é bem próxima da periferia (diâmetro externo), devido à posição da aresta de corte da ferramenta em relação ao sobremetal do corpo de prova (Fig. 11). Já na situação inversa, quando apresenta ângulos com valores negativos essa região de contato aproxima-se próximo ao centro da ferramenta (evitando o corte pelo centro), garantindo maior estabilidade da ferramenta.

Esse fenômeno é análogo com o experimento feito por Scandiffio, Diniz e Fagali (2016), citado acima. Quando a ferramenta orientada de forma positiva, ela assemelha-se a condição de fresamento ascendente na usinagem em 3 eixos, tendo uma piora na qualidade da rugosidade superficial. E o inverso é verdadeiro, quando a orientação for negativa, a usinagem de contorno de perfil em 5 eixos fica similar ao fresamento descendente quando se usina em três eixos.

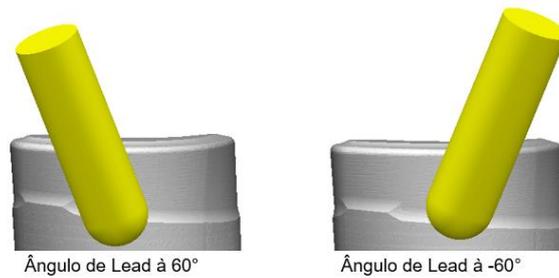


Figura 11. Posição da ferramenta em relação ao sobremetal do corpo de prova

4. CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi usinar faces de uma superfície complexa, variando o *Lead Angle* e assim influenciando na rugosidade superficial da amostra usinada.

De acordo com os resultados e análise dos mesmos, de fato variando apenas o *Lead Angle* constatou-se uma grande influência na rugosidade superficial do corpo de provas, comprovando, de acordo com literaturas e experimentos realizados a meta deste trabalho.

Para posteriores trabalhos relativos à influência dos ângulos de inclinação em usinagem com 5 eixos simultâneos, qual é a influência destes ângulos na geometria da peça no que se refere à tolerância de forma de superfície.

5. REFERÊNCIAS

- Diniz, A. D., Marcondes, F. C. e Coppini, N. L., 2014. *Tecnologia da usinagem dos materiais*. Artliber, São Paulo.
- ISO 4288, 1996, “Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture: Profile method — Rules and procedures for the assessment of surface texture”.
- Kull Neto, H., 2016. *Estudo das estratégias de usinagem visando a minimização da vibração no fresamento de superfícies convexas*. Ph.D. thesis, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.
- Miralles, C.E., 2009. *Análise das estratégias de corte no fresamento com cinco eixos*. Master’s thesis, Universidade Metodista de Piracicaba, Piracicaba, Brasil.
- Ozturk, E., Tunc, L. T., Budak, E., 2009. “Investigation of lead and tilt angle effects in 5-axis ball-end milling processes”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, No. 49, pp.1053-1062.
- Pattaro Junior, R. G., 2019. *Estudo do consumo de energia durante a usinagem de uma cavidade de molde com diferentes estratégias*. Master’s thesis, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.
- Scandiffio, I., Diniz, A. E. e Fagali, A., 2016. “Evaluating surface roughness, tool life, and machining force when milling free-form shapes on hardened AISI D6 steel”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.82, No.9-12, pp. 2075-2086.
- Souza, G. O., 2006. *Fresamento em 5 eixos simultâneos de pás de compressores de turbinas a gás em TiAl6V4*. Master’s thesis. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.
- Souza, G. O., 2011. *Avaliação da aplicação do Fresamento em 5 eixos a conjuntos de superfícies complexas*. Ph.D. thesis, Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, Brasil.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.