

PROJETO SMART CAM: IDENTIFICAÇÃO DA ÁREA E ESPESSURA MÁXIMA DO CAVACO GERADO NO FRESAMENTO DE FORMAS COMPLEXAS PARA FUTURO MODELO DE FORÇA DE CORTE

Felipe Marin

Universidad del País Vasco (UPV/EHU) – Centro de Fabricación Avanzada Aeronáutica, Parque Tecnológico de Bizkaia 202, Zamudio/Bizkaia 48170, Espanha

Alessandro Roger Rodrigues

Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, Avenida Trabalhador São-Carlense 400, São Carlos/SP 13.566-590, Brasil
roger@sc.usp.br

Vitor Jacintho Leal de Carvalho

Helton da Silva Gaspar

Adriano Fagali de Souza

Universidade Federal de Santa Catarina – Campus Joinville, Rua dona Francisca 8300, Joinville/SC 89.219-600, Brasil
adriano.fagali@ufsc.br

Resumo. No fresamento de formas complexas utilizando fresas de ponta esférica, ocorrem constantes alterações no contato ferramenta-peça. Conhecer estas alterações e a geometria do cavaco formado em cada posição é necessário para prever as componentes da força de corte e estimar desgaste de ferramentas, erros geométricos e a topografia da superfície usinada. Os sistemas CAD/CAM atuais não são capazes de identificar estas condições geométricas. Assim, este trabalho apresenta um modelo desenvolvido para identificar a área transversal e a espessura do cavaco, de forma dinâmica, ao decorrer do contato da aresta da ferramenta com o material usinado, considerando a curvatura da superfície em relação ao eixo de rotação da fresa de ponta esférica. Este modelo poderá ser utilizado para prever a força de fresamento de formas complexas, conforme a posição da ferramenta sobre a superfície, empregando modelos mecânicos. A matemática proposta para cálculo da área e espessura do cavaco apresentou erros inferiores a 1% em quase toda faixa de formação do cavaco, sendo satisfatório para correta representação do corte. Valores comparados com simulações geométricas em um sistema CAD.

Palavras chave: Fresamento. Formas complexas. Contato ferramenta-peça. Força de corte.

1. INTRODUÇÃO

Produtos e componentes contendo formas geométricas complexas são amplamente utilizados no mercado atual, desde simples embalagens, brinquedos, eletrodomésticos até em automóveis e aeronaves. Para fabricar superfícies complexas o fresamento CNC é amplamente empregado. Em operações de acabamento, normalmente são utilizadas ferramentas de ponta esférica (Shujuan *et al.*, 2019; Chen *et al.*, 2005).

Entende-se por superfície complexa ou de formato esculpido, toda superfície que não pode ser representada por geometrias de matemática convencional como linhas, círculos, arcos e elipses, bem como seus derivados tridimensionais. Como principal característica essas superfícies apresentam constante variação do raio de curvatura instantâneo (Souza e Ulbrich, 2013)

Na usinagem destas geometrias com ferramentas esféricas, o contato ferramenta-peça altera-se constantemente. Assim, altera-se o raio efetivo de corte e, por consequência, a velocidade de corte, a força de usinagem que levam a erros geométricos (Habibi *et al.*, 2019; Zeroudi e Fontaine, 2015).

O contato ferramenta peça no fresamento de uma superfície complexa com ferramentas de ponta esférica de raio r é mostrado na Fig. 1. Conforme altera-se o ângulo θ formado entre os vetores $\vec{a}$ e $\vec{V}_N$, respectivamente vetor da ferramenta e normal da peça, altera-se a região em que atua a aresta na formação do cavaco, delimitado um raio máximo de segmento $\overline{ba}$ e mínimo, de segmento $\overline{b'a'}$.

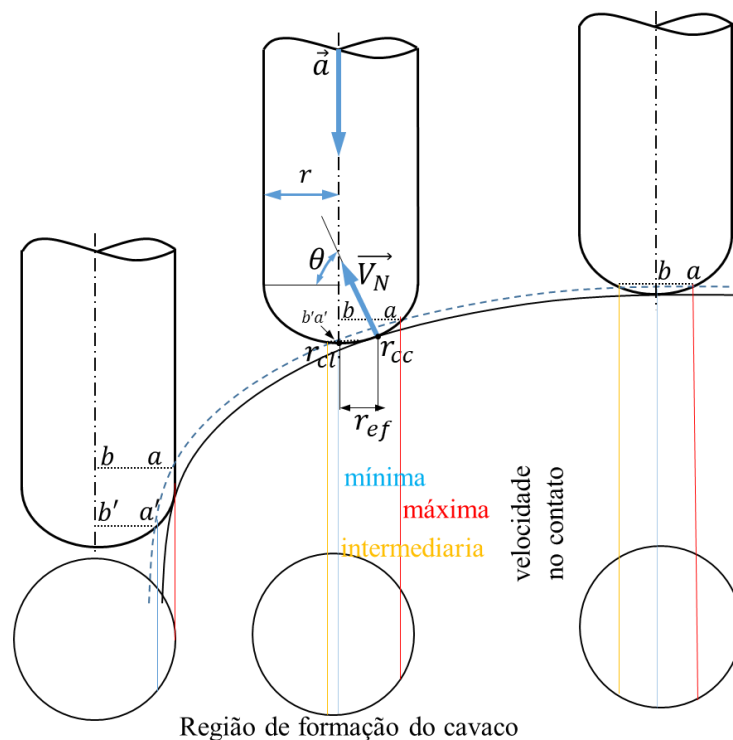


Figura 1. Contato ferramenta peça e região de formação do cavaco.

O raio efetivo de corte (r_{ef}), é definido como a menor distância normal entre o ponto de contato e o eixo de rotação da ferramenta. No corte com a região próxima do centro da ferramenta, o raio efetivo de corte tende a zero e juntamente a isso, a velocidade tangencial.

Para se estimar a força de corte durante processos de usinagem, o modelo mecânico de Kienzle é amplamente empregado. Neste modelo deve-se relacionar a área de seção transversal do cavaco com uma constante de pressão específica de corte k_s que caracteriza o material (Zeroudi e Fontaine, 2015). No entanto, no fresamento de formas complexas, com as constantes alterações do contato-ferramenta peça, a seção transversal do cavaco também se altera, tornando impraticável prever a força de corte neste caso (Chen et al., 2012; Wei et al., 2019). Os sistemas CAD/CAM atuais não são capazes de identificar tais alterações do contato ferramenta-peça.

No fresamento de formas complexas ocorrem condições nas quais o corte não é predominantemente realizado por cisalhamento, como no fresamento convencional, mas sim por deformação plástica. Este caso é conhecido pelo termo em inglês *ploughing* (De Souza et al., 2014). Estas condições resultam em maiores esforços de corte além de denegrir a rugosidade da superfície usinada. Estes casos ocorrem quando a extremidade central da ferramenta é responsável pelo corte e a velocidade da corte é extremamente baixa, até nula, onde o centro atua (De Souza et al., 2014).

Assim, os modelos empregados para prever a força de corte nestes casos de usinagem possuem duas limitações: i) o raio efetivo de corte da ferramenta que se altera constantemente, e isso não é considerado nos modelos atuais, e ii) o fenômeno *ploughing*, também não é considerado.

Desta forma, o presente trabalho foca-se no primeiro item: desenvolver um modelo matemático para identificar o raio efetivo de corte da ferramenta em função da superfície usinada, e assim, conhecer a área e a espessura do cavaco, de forma dinâmica, no decorrer da atuação de cada aresta. Este trabalho fornece subsídios para contribuir com um futuro modelo de força para fresamento de formas complexas, onde pode ser fazer uso de modelos convencionais (ex.: Kienzle) adicionando o raio efetivo e instantâneo da ferramenta de corte (assim, a real velocidade de corte em cada momento da usinagem) além da possibilidade de incluir modelos mais avançados considerando o efeito *ploughing*. Este trabalho é o resultado inicial de um projeto amplo, denominado SMART CAM, com o objetivo de desenvolver ferramentas computacionais para auxiliar a fabricação de formas complexas por fresamento.

2. METODOLOGIA

Um modelo matemático foi desenvolvido para identificar variáveis do processo de corte, de forma dinâmica, ao decorrer do contato entre cada aresta de corte da ferramenta. As variáveis do processo identificadas são: 1) raio efetivo de corte da ferramenta de ponta esférica em função da curvatura da superfície usinada, 2) área e a espessura do cavaco ao longo de sua formação. Para desenvolver este trabalho, a metodologia é dividida em três itens, a citar: i) condições de contorno do contato ferramenta-peça, ii) equacionamento matemático das variáveis, iii) validação dos valores obtidos.

i) Condições de contorno do contato ferramenta-peça

Inicialmente, identificou-se no processo de fresamento com fresas de ponta esférica, simplificações que permitem representar satisfatoriamente o processo e otimizar o processo de cálculo. As quatro condições são citadas a seguir.

- a) A ferramenta corta apenas na calota esférica: As ferramentas com ponta esférica têm como principal característica uma grande liberdade de contato sendo aplicadas principalmente em operações onde outras ferramentas não apresentam a mesma capacidade de engajamento. Devido a geometria da ferramenta, a taxa de remoção é bastante reduzida em comparação a ferramentas de topo ou tóricas de mesmo diâmetro cortando com uma mesma profundidade de corte. Assim, são ferramentas utilizadas predominantemente em operação de acabamento de superfícies. Dessa forma, assumiu-se que a operação realizada pela ferramenta de ponta esférica é exclusivamente de acabamento sem atuação do flanco da ferramenta.
- b) Discretização de superfície complexa em superfícies inclinadas: Similar ao que acontece na manufatura de superfícies complexas utilizando programação CNC com interpolação linear (DIN 66025), as superfícies complexas podem ser discretizadas em um conjunto de pequenos segmentos de superfícies. A principal vantagem deste modelo discreto é o cálculo com um modelo de superfície conhecida, no caso planos. Como desvantagem dos modelos discretos, apresentam um maior custo computacional.
- c) Discretização da passada lateral anterior por uma superfície cilíndrica: Da mesma forma da consideração 2, a aproximação da superfície da passada lateral anterior pode ser representada pela discretização de segmentos cilíndricos.
- d) Devido a magnitude da velocidade tangencial ser muito superior a velocidade no sentido do avanço é possível considerar o desenvolvimento de um cavaco em uma rotação. Dessa forma a aresta em uma rotação completa sobre seu eixo remove todo o material sendo defasada por f_z para a formação do cavaco seguinte.

ii) Equacionamento matemático das variáveis

Neste trabalho são apresentadas as matemáticas para a identificação das curvas de contorno do cavaco, durante a sua formação. As equações das geometrias que representam o cavaco são apresentadas em maior detalhe no item 3.1. As curvas que formam o cavaco correspondem respectivamente ao contorno do cavaco, e que se alteram conforme a rotação da ferramenta (em cada instante da atuação da aresta na formação do cavaco), curvas da superfície e os parâmetros de corte (f_z , a_p e a_e). Elas são utilizadas para calcular a área e a espessura do cavaco, ao longo de sua formação em função do raio ρ e ângulo θ . Para o cálculo da área e espessura máxima do cavaco, utilizando os modelos desenvolvidos, foi empregado o software Gnuplot.

iii) Validação dos valores obtidos.

Para validação da matemática desenvolvida neste trabalho para cálculo da área e da espessura do cavaco formada com uma completa revolução da aresta da ferramenta, as equações foram plotadas no software Gnuplot. Os valores calculados e plotados foram comparados com os valores da área e da espessura obtidos com modelamento em um sistema CAD. Foram avaliadas a secção do cavaco em 11 instantes em função do ângulo de posição (θ) da aresta para mensurar o erro da matemática proposta.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Geometrias envolvidas e equacionamento

As superfícies que representam o modelamento de uma ferramenta considerando a superfície e o vetor normal da ferramenta são apresentados na Fig. 2. As geometrias que formam o cavaco são: 1) plano da superfície, 2) esfera formada pela aresta na passada anterior, 3) esfera formada pela aresta na passada atual e 4) cilindro da passada lateral anterior.

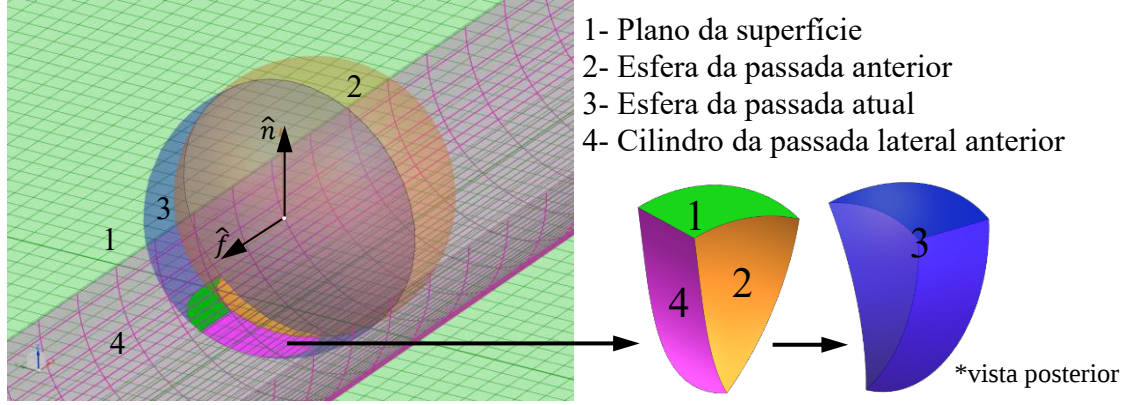


Figura 2. Superfícies envolvidas na formação do cavaco com ferramenta de ponta esférica.

Considerando o sistema de coordenadas com origem no centro da ferramenta. O vetor normal unitário da superfície é dado pela Eq. (1). O vetor unitário na direção do avanço é mostrado na Eq. (2) e a direção do passe lateral é definido pelo vetor bi-normal mostrado na Eq. (3).

$$\hat{n} = \frac{(0,0,0),(n_x,n_y,n_z)}{|(0,0,0),(n_x,n_y,n_z)|} \quad (1)$$

$$\hat{f} = \frac{(0,0,0),(n_z,0,n_x)}{|(0,0,0),(n_z,0,n_x)|} \quad (2)$$

$$\hat{g} = \hat{n} \times \hat{f} \quad (3)$$

A partir do sistema de referência definido na ponta da ferramenta é possível expressar matematicamente as superfícies envolvidas no corte. A superfície do plano atual é mostrada na Eq. (4), a superfície da passada atual e da passada anterior nas Eq. (5) e Eq. (6) respectivamente, e o cilindro formado pela passada lateral anterior na Eq. (7).

$$\rho_1(\theta, z) = \frac{(a_p - R) - n_z z}{n_x \sin(\theta) + n_y \cos(\theta)} \quad (4)$$

$$\rho_2(z) = \sqrt{R^2 - z^2}, \quad \theta = \forall \quad (5)$$

$$|\rho_3 \hat{r} + z \hat{k} + f_z \hat{f}|^2 = R^2 \quad (6)$$

$$|\rho_4 \hat{r} + z \hat{k} - a_e \hat{g} - (\rho_4 \hat{r} \cdot \hat{f} + z \hat{k} \cdot \hat{f})| = R \quad (7)$$

3.2. Cálculo da área e espessura do cavaco

Utilizando as Eq. (4-7) em coordenadas cilíndricas com o software de representação geométrica Gnuplot e aplicando respectivas limitações foi calculada a área transversal e a espessura máxima do cavaco em função do ângulo de aresta θ . Os valores calculados para a área transversal e espessura do cavaco para 3 condições de inclinação da ferramenta, 0°, 5° e 45° de inclinação na direção do avanço (*lead angle*) são apresentados respectivamente nas Figuras 3, 4 e 5.

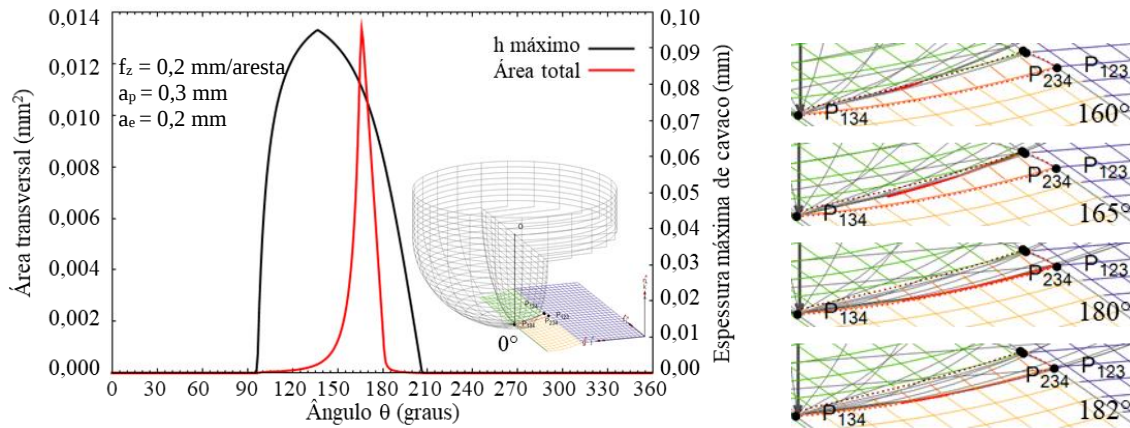


Figura 3. Formação instantânea da área e da espessura máxima do cavaco sem inclinação da ferramenta.

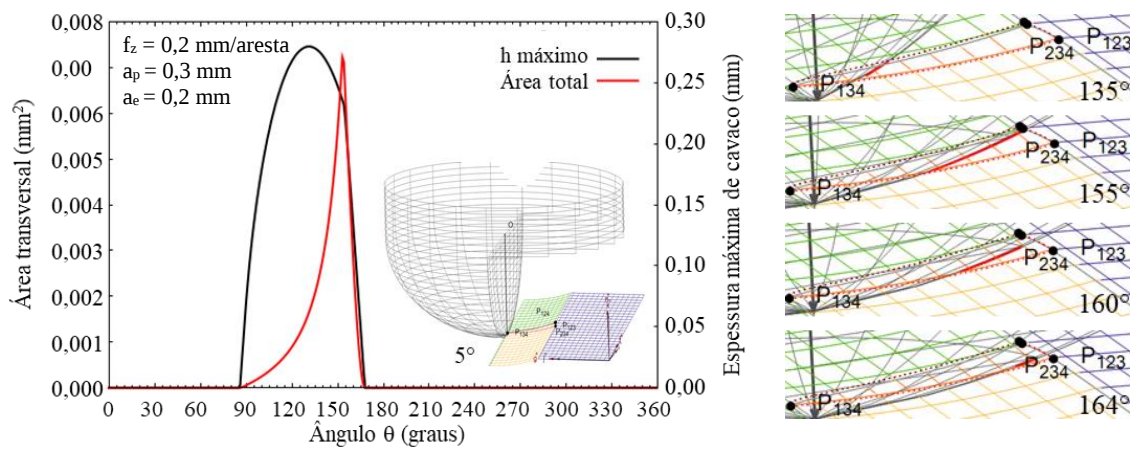


Figura 4. Formação instantânea da área e da espessura máxima do cavaco para ângulo de inclinação de 5°.

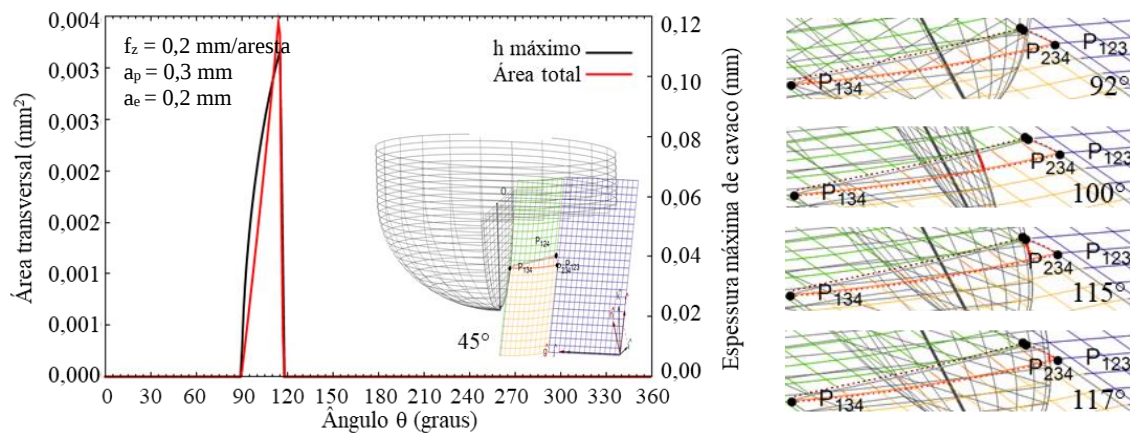


Figura 5. Formação instantânea da área e da espessura máxima do cavaco para ângulo de inclinação de 45°.

O cálculo da área e espessura do cavaco para diferentes ângulos de posição (θ) da aresta de corte mostra que com a guinada da ferramenta em 45° na direção do avanço, o sentido de remoção do cavaco passa de ser predominantemente no sentido do avanço, para dominante no sentido lateral. Isso resulta em menor quantidade de material removido como mostrado na Fig. 3, reduzindo forças de corte e problemas correlacionados. Ao tomar a ferramenta na direção do avanço, também se observa que a secção removida por revolução, bem como o início e final do corte são reduzidos.

3.3. Validação

Foi realizada a validação do desenvolvimento matemático comparando o cavaco calculado pela matemática e plotado no software Gnuplot com o cavaco parametrizado em software CAD. A área de corte e a espessura do cavaco para 11 diferentes ângulos θ foram comparados, o resultado desta comparação é mostrado na Fig. 6 e detalhados na Tab. 1.

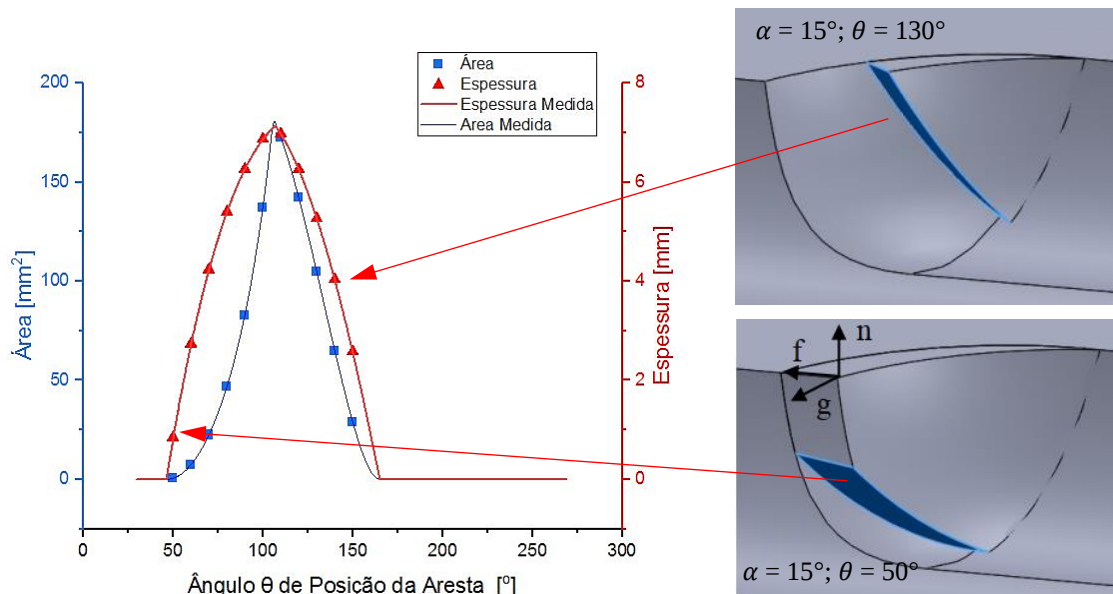


Figura 6. Validação da matemática pela área medida em CAD.

Tabela 1. Comparação da área e espessura máxima do cavaco para corte com f_z de 0.1, a_e de 0.4 e a_p de 0.2.

α	θ	área CAD	área calculada	erro (%)	h máx. CAD	h máx. calculado	erro (%)
15	50	0.56	0.52	6.09%	0.85	0.79	6.87%
	60	7.46	7.35	1.52%	2.74	2.70	1.47%
	70	22.59	22.40	0.85%	4.24	4.23	0.28%
	80	46.88	46.58	0.63%	5.4	5.39	0.20%
	90	83.07	82.63	0.53%	6.27	6.25	0.27%
	100	137.47	136.80	0.49%	6.87	6.86	0.20%
	110	172.74	173.00	-0.15%	6.98	6.98	0.02%
	120	142.20	142.54	-0.24%	6.26	6.26	-0.05%
	130	104.75	105.14	-0.37%	5.27	5.28	-0.18%
	140	65.15	65.53	-0.59%	4.04	4.05	-0.17%
	150	29.12	29.44	-1.10%	2.58	2.59	-0.32%

Observa-se na Fig. 6 que os valores medidos no software CAD para área e espessura máxima do cavaco se sobrepõem a curva obtida pela matemática de cálculo desenvolvido, sendo satisfatório para uma boa representação geométrica e melhor entendimento do fenômeno de corte.

Ao comparar detalhadamente os erros obtidos, a matemática proposta tem erros inferiores a 1 % em quase toda faixa angular que forma o cavaco, como se observa na Tab. 1. Observa-se também, que os maiores erros acontecem no início da formação do cavaco. Dessa forma os erros não devem ser propagados significativamente quando incluídos em futuros cálculos de forças e deformações pois tanto a área como a espessura máxima são muito pequenas nessas regiões. Sendo assim, pode ser considerado satisfatório para representar o problema investigado.

4. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresenta a matemática desenvolvida para calcular as características geométricas do cavaco gerado pelo fresamento de superfícies complexas com ferramentas de ponta esférica. As simulações geométricas realizadas com o CAD demonstraram que o erro de precisão do modelo de cálculo é inferior a 1% em quase toda a faixa de formação do cavaco. Estas informações geométricas podem ser utilizadas para prever a força de usinagem e suas consequências no fresamento com ferramentas de ponta esférica.

Futuramente, pretende-se implementar esta ferramenta computacional em sistema CAD/CAM comercial, com o objetivo aprimorar os processos de usinagem de formas complexas.

5. AGRADECIMENTO

A CAPES pelas bolsas de pesquisa e investigação e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico CNPq (Bolsa 201478/2018-8).

6. REFERENCIAS

- Chen, J. S., Huang, Y. K., e Chen, M. S. (2005) A study of the surface scallop generating mechanism in the ball-end milling process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(9), 1077–1084. doi:10.1016/j.ijmachtools.2004.11.019
- Chen, X., Zhao, J., Li, Y., Han, S., Cao, Q., e Li, A. (2012) Investigation on ball end milling of P20 die steel with cutter orientation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 59(9–12), 885–898. doi:10.1007/s00170-011-3565-2
- De Souza, A. F., Diniz, A. E., Rodrigues, A. R., e Coelho, R. T. (2014) Investigating the cutting phenomena in free-form milling using a ball-end cutting tool for die and mold manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 71(9–12), 1565–1577. doi:10.1007/s00170-013-5579-4
- Habibi, M., Tuysuz, O., e Altintas, Y. (2019) Modification of Tool Orientation and Position to Compensate Tool and Part Deflections in Five-Axis Ball End Milling Operations. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 141(3), 1–9. doi:10.1115/1.4042019
- Shujuan, L., Dong, Y., Li, Y., Li, P., Yang, Z., e Landers, R. G. (2019) Geometrical simulation and analysis of ball-end milling surface topography. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102(5–8), 1885–1900. doi:10.1007/s00170-018-03217-5
- Wei, Z. C., Guo, M. L., Wang, M. J., Li, S. Q., e Wang, J. (2019) Prediction of cutting force for ball end mill in sculptured surface based on analytic model of CWE and ICCE. *Machining Science and Technology*, 23(5), 688–711. doi:10.1080/10910344.2019.1575408
- Zeroudi, N., e Fontaine, M. (2015) Prediction of tool deflection and tool path compensation in ball-end milling. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 26(3), 425–445. doi:10.1007/s10845-013-0800-8
- Souza, A. F.; Ulbrich, C. B. L. (2013). Engenharia Integrada por Computador e Sistemas CAD/CAM/CNC. Princípios e Aplicações. Editora: ArtLiber. 335P. ISBN 8588098903.

SMART CAM PROJECT: IDENTIFICATION OF TRANSVERSAL AREA AND MAXIMUM CHIP THICKNESS FOR FUTURE MILLING CUTTING STRENGTH MODEL IN FOR SCULPTURED SHAPES

Felipe Marin

Universidad del País Vasco (UPV/EHU) – Centro de Fabricación Avanzada Aeronáutica, Parque Tecnológico de Bizkaia 202, Zamudio/Bizkaia 48170, Espanha

Alessandro Roger Rodrigues

Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, Avenida Trabalhador São-Carlense 400, São Carlos/SP 13.566-590, Brasil
roger@sc.usp.br

Vitor Jacintho Leal de Carvalho

Helton da Silva Gaspar

Adriano Fagali de Souza

Universidade Federal de Santa Catarina – Campus Joinville, Rua dona Francisca 8300, Joinville/SC 89.219-600, Brasil
adriano.fagali@ufsc.br

Abstract. When milling sculptured shapes using ball-end mills, the contact between the tool and the part contact changes constantly. To know the changes and the chip geometry in each position is necessary to predict the components of the cutting force, estimating also tool wear, geometric errors and the topography of the machined surface. The current CAD / CAM systems are not able to identify these geometric conditions. Thus, this work presents a model developed to identify the transversal area and the maximum chip thickness dynamically during the contact of the tool edge with the machined material, considering the curvature of the surface in relation to the axis of rotation of the ball end mill. Thus, this model can be used to predict the milling force of sculptured shapes, according to the position of the tool on the surface, using a mechanistic model. The mathematics proposed for calculating the chip area and thickness presented errors inferior to 1% in almost every range of the chip formation, being satisfactory for the correct representation of the cut. The values were compared with geometric simulations in a CAD system.

Keywords: Milling. Sculptured surfaces. Tool-part contact. Cutting force.

RESPONSIBILITY NOTICE

The author(s) is (are) the only responsible for the printed material included in this paper.