

FRESAMENTO EM SUPERFÍCIES COMPLEXAS – INFLUÊNCIAS DO SENTIDO DE CORTE E DEFLEXÃO DA FERRAMENTA DE CORTE

Andrei Albuquerque da Silva*
Adriano Fagali de souza**

Resumo

Ferramentas de corte para fresamento de formas complexas devem possuir uma ponta esférica para propiciar melhor contato durante a usinagem. Esta condição de contato-ferramenta ainda não existe um entendimento pleno sobre os fenômenos de corte que ocorrem sob essas condições. Este trabalho foi realizado para contribuir para um maior entendimento sobre o tema. Foram usinados quatro condições de corte, variando o comprimento de balanço da ferramenta e o sentido de corte. Para cada caminho foi mensurado a deformação geométrica (erro de forma) entre regiões côncavas e convexas. Para cada ponto foi medida a rugosidade e calculada a velocidade de corte através de um modelo matemático desenvolvido neste artigo. Foi determinada a partir dos resultados obtidos, uma relação entre a velocidade de corte e a rugosidade, além de padrões bem definidos que estabelecem um melhor acabamento superficial.

Palavra-chave: Superfícies Complexas, Sentidos de Cortes Concordante e Discordante, Deflexão da Ferramenta de Corte, Sistema CAD/CAM.

*Graduando do curso de Bacharelado Interdisciplinar em Mobilidade – E-mail: andrei.albuquerque.s@gmail.com

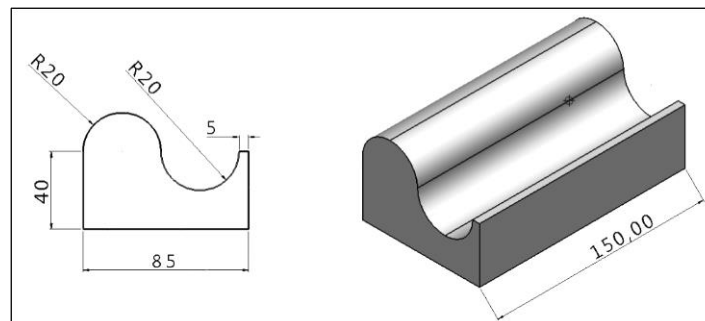
**Professor, Doutor do curso de Bacharelado Interdisciplinar em Mobilidade da Universidade Federal de Santa Catarina.

1 – Introdução

Moldes e matrizes são importantes ferramentas na fabricação de peças para diversos segmentos industriais, em grande parte das vezes, possuem superfícies não planares, que também chamadas de superfícies complexas.

Ainda não se tem um conhecimento pleno dos fenômenos causados pela usinagem dessa superfície. Souza, et al. colaborou para este entendimento estudando estas superfícies, contudo, apenas para regiões convexas. Este trabalho estudará regiões côncavas e convexas, através da usinagem da peça mostrada na figura 1. A geometria escolhida nos permite estudar superfícies côncavas- ascendentes, côncavas- descendentes, convexas- ascendentes e convexas- descendentes.

Figura 1 – Geometria do corpo de prova



Para usinagem em superfícies complexas, deve ser usado uma ferramenta com ponta esférica, para que em todo o momento da usinagem exista contato entre a ferramenta e a peça. A velocidade de corte se altera a medida que o raio efetivo de corte também se altera, tendo velocidade mínima nula quando a posição central da ferramenta estiver localizada no vale ou na crista da peça.

Foram empregadas estratégias de usinagem para fabricar o corpo de prova e em seguida foram verificados quais os efeitos que cada estratégia causou na qualidade superficial e na deformação geométrica da peça, sendo eles:

- Sentido de corte da ferramenta: Existem dois sentidos de corte, o concordante, no qual a velocidade de corte e o avanço da ferramenta possuem o mesmo sentido e

o discordante, em que o sentido da velocidade de corte é oposto ao avanço da ferramenta;

- Balanço da ferramenta: Comprimento do mandril, onde a ferramenta é fixada, até a extremidade de corte;
- Velocidade efetiva de corte: Velocidade instantânea que a ferramenta aplica na peça enquanto estão em contato;
- Raio efetivo de corte: Distância perpendicular entre o ponto de contato ferramenta-peça e o eixo axial da ferramenta.

2 – Materiais e métodos

O ensaio foi realizado na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) /Campus Joinville, em um centro de usinagem vertical com três eixos (x, y e z), modelo Romi D600, faixa de rotação máxima eixo *Árvore* 7500 RPM. A peça para o ensaio é de material aço AISI P20 com dureza 30HRC.

Inicialmente, com geometria quadrada para facilitar o desbaste superficial. O critério para a escolha das ferramentas e os parâmetros de corte foram definidos conforme a orientação do fornecedor de ferramentas da Sandvik Coromant. Para o fresamento foram selecionados duas fresas, onde uma fresa de desbaste com \varnothing 20 mm utilizam dois insertos de metal duro de ponta esférica (“*ball nose*” – Sandvik Coromant), para o acabamento superficial uma fresa esférica com \varnothing 6,0 mm, velocidade de corte (V_c) estipulada em 103.000 m/min, avanço da ferramenta (V_f) 1.000 mm/min, rotação da ferramenta (n_f) 5.500 RPM, profundidade de corte (a_p) 0,5mm e penetração de trabalho (a_e) 0,2 mm, não foi utilizado fluido de corte. Nestes ensaios foi adotado o critério de ferramentas novas, evitando-se as variações devido à vida da ferramenta.

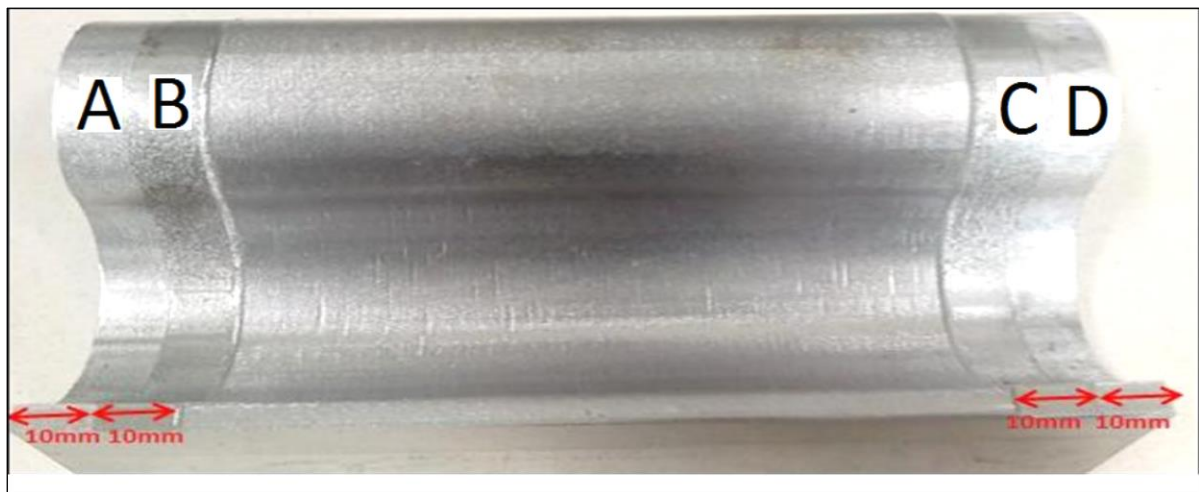
Para o acabamento foram usinadas no corpo de prova quatro regiões com 10,0 mm de largura, nomeadas por trajetória A, B, C e D. Para a trajetória A e B, foram adotados os sentidos discordantes de corte, e para C e D, os sentidos concordantes. As trajetórias A e D foram usinadas com 41,4 mm de balanço da ferramenta e as trajetórias B e C, com 60,7 mm,

conforme tabela 1. A figura 2 mostra as quatro trajetórias, com acabamento, de acordo com as estratégias citadas acima.

Tabela 1 - Trajetórias, sentidos e balanços da ferramenta

TRAJETÓRIA	A	B	C	D
SENTIDO	Discordante	Discordante	Concordante	Concordante
BALANÇO [mm]	41,4	60,7	60,7	41,4

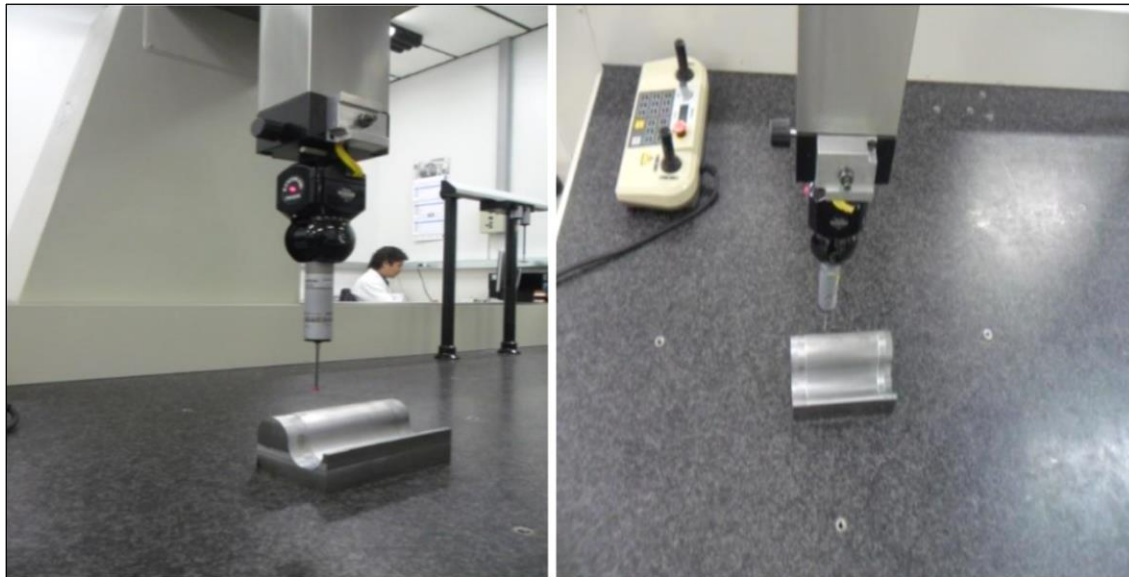
Figura 2 - Acabamento das 4 trajetórias estudadas



2.1 – Erro de forma

As análises nos erros geométricos foram realizadas na Fundação Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras (CERTI), por uma máquina de medir por coordenadas (MMC), modelo Zeiss Prismo-Ultra, com cabeçote fixo e ponteira com esfera de 4,0 mm, elaborado um programa CNC por arraste, onde percorreu toda a geometria do corpo de prova no sentido longitudinal, executando uma varredura, totalizando 637 pontos, seguindo a identificação no corpo de prova, em cada região fresada.

Figura 3- Medições do erro de forma

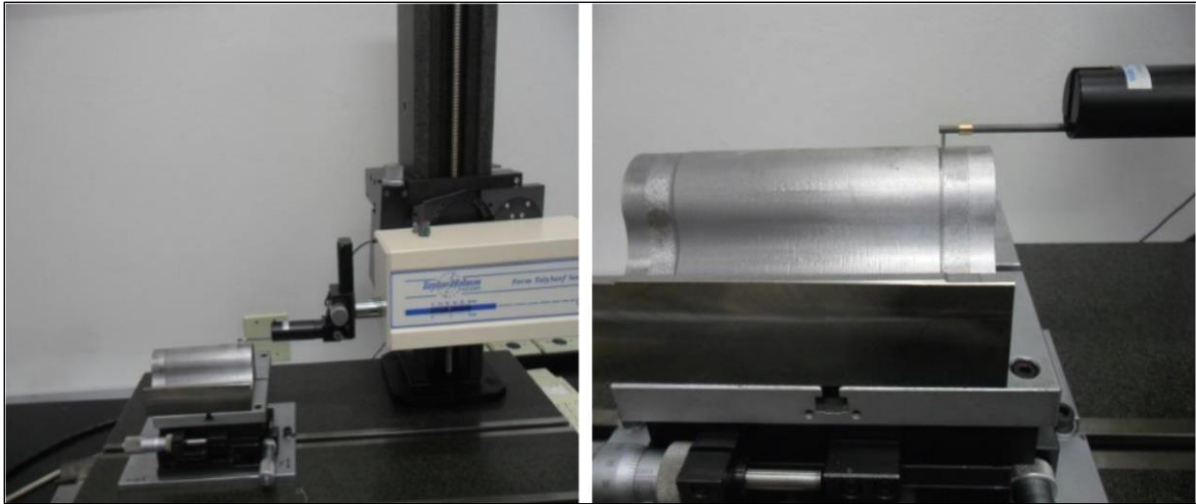


O desgaste da ferramenta foi monitorado após cada teste através de um estéreo microscópio da marca Olympus, modelo SZ6145TR, e o programa de captura de imagens, Image Pro-Express. O desgaste de flanco máximo ($VB_{m\acute{a}x}$) foi medido obedecendo a norma ISO 3685 para operações de acabamento.

2.2 – Rugosidade

As medições da rugosidade também foram realizadas na CERTI por um interferômetro da marca Taylor Hobson, modelo Talysurf CLI 2000, conforme pode ser visto na figura 4. A medição do acabamento superficial do cume foi realizada considerando-se uma área de 1mm^2 . Nesta medição, utilizou-se um espaçamento entre pontos de $0,5\ \mu\text{m}$ e um espaçamento entre linhas de $2\ \mu\text{m}$. A velocidade de medição foi definida em $200\ \mu\text{m/s}$, num tempo de medição, aproximado, de 26 minutos por trajetória. O comprimento de amostragem foi de $0,25\text{mm}$ (NBR ISO 4288, 2008), foi aplicado o filtro de Gauss.

Figura 4 – Medições da rugosidade



O valor de Ra em um comprimento de amostragem indica a média da rugosidade. Por isso, se um pico ou vale não típico aparecer na superfície, o valor da média não sofrerá grande alteração, ocultando o defeito. O Ra é o parâmetro de medição mais utilizado em todo o mundo, por isso foi esse parâmetro que foi utilizado em nossa análise.

2.3 – Velocidade efetiva de corte

Diferente do que ocorre com uma superfície plana, a usinagem em superfícies complexas necessita de uma ferramenta de corte com ponta esférica para que esta sempre mantenha contato com a peça. No decorrer da trajetória descrita pela ferramenta ocorre uma variação da distância entre o ponto de contato com a peça e o eixo axial que passa no centro da ferramenta, denominado raio efetivo, tendo um valor máximo (R_{efcmax}) e mínimo (R_{efcmin}). Utilizamos o diâmetro efetivo de corte ($D_{efc} = 2 \cdot R_{efc}$) para calcular a velocidade efetiva de corte, em metros por minuto (m/min), conforme a equação 1, onde n é a rotação da ferramenta de corte em rad/s.

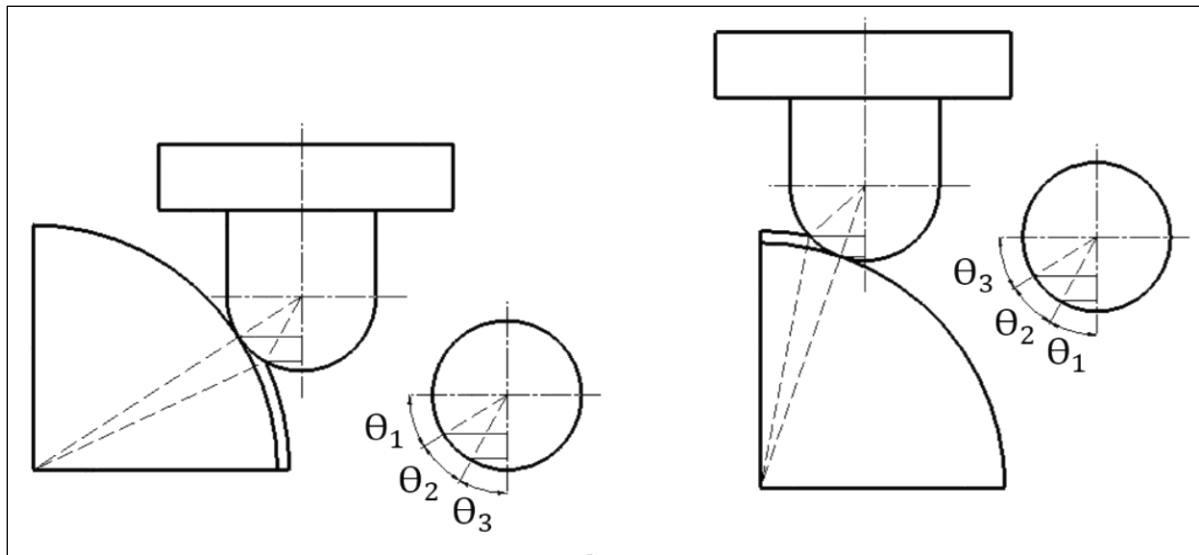
$$\text{Equação 1: } V_{efc} = \frac{\pi \cdot 2 \cdot R_{ef} \cdot n}{1000}$$

Os valores diâmetros efetivos dependem da concavidade (côncavo ou convexo) e do sentido de corte (ascendente e descendente). Para determiná-los precisamos avaliar cada região separadamente.

2.3.1 – Superfície convexa

Para determinar o raio efetivo de corte de uma superfície convexa, sendo ela descendente ou ascendente, precisamos nos familiarizar com alguns ângulos. O ângulo Θ_1 é formado pela reta que passa pelo centro da circunferência da superfície usinada e o centro da ferramenta de corte com a horizontal, Θ_2 é o menor ângulo formado pela reta que cruza o centro da ferramenta com os pontos extremos de contato entre a ferramenta e a peça, conforme podemos observar na figura 5.

Figura 5 – Superfícies convexas, descendente e ascendente



O valor de Θ_1 é conhecido, está relacionado apenas ao ponto no qual a ferramenta se localiza naquele exato momento, Θ_2 é determinado pelas equações 2 e 3, e depende do raio da peça (R_p), raio da ferramenta (R_f) e da profundidade de corte (A_p), Θ_3 é complementar a $\Theta_1 + \Theta_2$ e é determinado pela equação 4.

$$\text{Equação 2: } (R_p + A_p)^2 = (R_p + R_f)^2 + R_f^2 - 2 \cdot (R_p + R_f) \cdot R_f \cdot \cos(\Theta_2)$$

$$\text{Equação 3: } \Theta_2 = \cos^{-1} \frac{2 \cdot R_f^2 + 2 \cdot R_p \cdot R_f - 2 \cdot R_p \cdot A_p - A_p^2}{2 \cdot (R_p + R_f) \cdot R_f}$$

$$\text{Equação 4: } \Theta_3 = 90^\circ - \Theta_1 - \Theta_2$$

Para superfícies convexas com trajetórias descendentes, os valores de R_{efcmin} e R_{efcmax} são determinados pelas equações 5 e 6.

$$\text{Equação 5: } R_{efcmin} = R_f \cdot \cos(\Theta_1 + \Theta_2)$$

Equação 6: $R_{efcmax} = R_f \cdot \cos(\theta_1)$

Para superfícies convexas com trajetórias ascendentes, os valores de R_{efcmin} e R_{efcmax} são representados pelas equações 7 e 8.

Equação 7: $R_{efcmin} = R_f \cdot \sin(\theta_1)$

Equação 8: $R_{efcmax} = R_f \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2)$

2.3.2 – Superfícies côncavas

Para encontrar o raio efetivo de corte de uma superfície côncava, sendo ela descendente ou ascendente, precisamos nos familiarizar com alguns ângulos. O ângulo ϕ_1 é formado pela reta que passa pelo centro da circunferência da superfície usinada e o centro da ferramenta de corte com a horizontal, ϕ_2 é o menor ângulo formado pelas retas que saem dos pontos extremos do contato ferramenta peça e o centro da concavidade da peça, ϕ_3 é o ângulo complementar a $\phi_1 + \phi_2$, ϕ_4 tem o mesmo valor de ϕ_1 , porém se localiza no centro da ferramenta de corte ao invés do centro da peça, ϕ_5 é o ângulo formado pelas retas que saem dos pontos extremos do contato ferramenta peça e o centro da concavidade da ferramenta e ϕ_6 é o ângulo complementar a $\phi_4 + \phi_5$ conforme podemos observar na figura 6 e 7.

Figura 6 – Superfícies côncava descendente

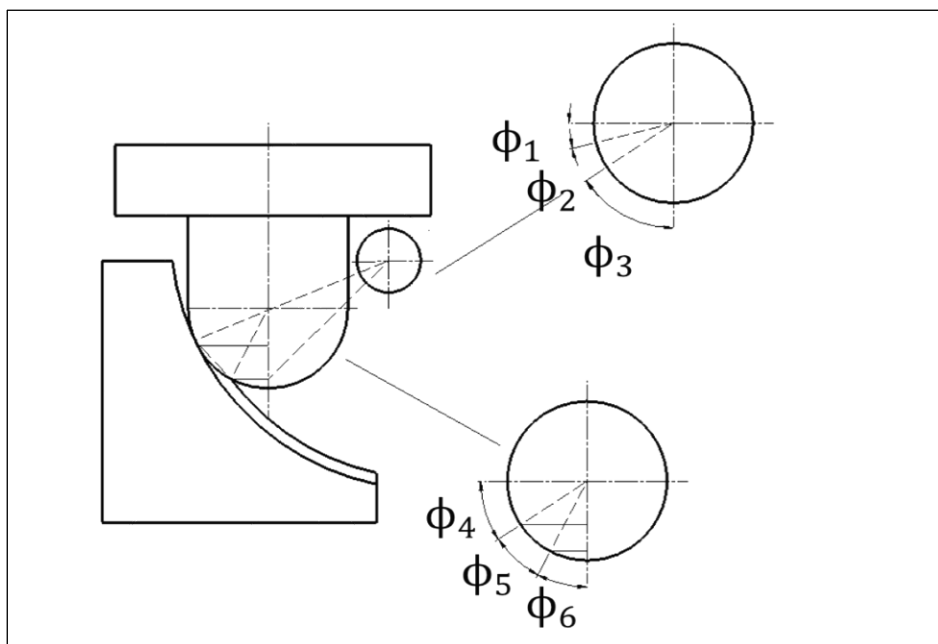
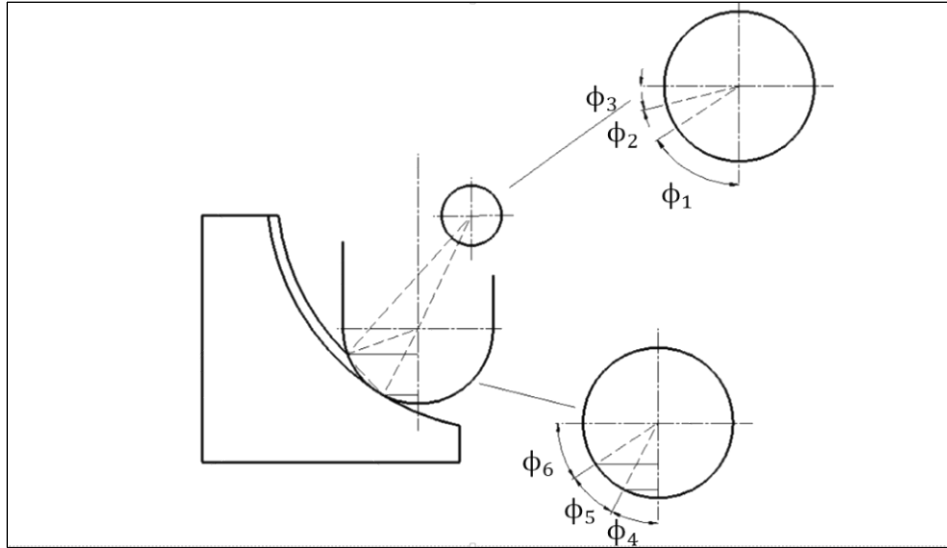


Figura 7 – Superfície côncava ascendente



O valor de ϕ_1 e ϕ_4 são conhecidos, são determinados apenas pela posição no qual a ferramenta está localizada, ϕ_2 é determinado pelas equações 9 e 10, e depende do raio da peça (R_p), raio da ferramenta (R_f) e da profundidade de corte (A_p), ϕ_3 como dito anteriormente é complementar aos demais ângulos e é determinado pela equação 11. Para encontrar ϕ_5 serão usadas as equações 12, 13 e 14. O segmento de reta que passa por pontos extremos do contato ferramenta-peça, será chamado de X.

$$\text{Equação 9: } R_f = (R_p - A_p)^2 + (R_p - R_f)^2 - 2 \cdot (R_p - A_p) \cdot (R_p - R_f) \cdot \cos(\phi_2)$$

$$\text{Equação 10: } \phi_2 = \cos^{-1} \frac{2 \cdot R_p^2 - 2 \cdot R_p \cdot A_p - 2 \cdot R_p \cdot R_f + A_p^2}{2 \cdot (R_p - A_p) \cdot (R_p - R_f)}$$

$$\text{Equação 11: } \phi_3 = 90^\circ - \phi_1 - \phi_2$$

$$\text{Equação 12: } X^2 = (R_p - A_p)^2 + R_p^2 - 2 \cdot (R_p - A_p) \cdot R_p \cdot \cos(\phi_2)$$

$$\text{Equação 13: } X^2 = R_f^2 + R_f^2 - 2 \cdot R_f \cdot R_f \cdot \cos \phi_5$$

$$\text{Equação 14: } \phi_5 = \cos^{-1} \frac{2 \cdot R_f^2 - X^2}{2 \cdot R_f^2}$$

Para superfícies côncavas com trajetórias descendentes, os valores de R_{efcmin} e R_{efcmax} são determinados pelas equações 15 e 16.

$$\text{Equação 15: } R_{efcmin} = R_f \cdot \cos(\phi_4 + \phi_5)$$

Equação 16: $R_{efcmax} = R_f \cdot \cos(\phi_4)$

Para superfícies côncavas com trajetórias ascendentes, os valores de R_{efcmin} e R_{efcmax} são determinados pelas equações 17 e 18.

Equação 17: $R_{efcmin} = R_f \cdot \sin(\phi_4 + \phi_5)$

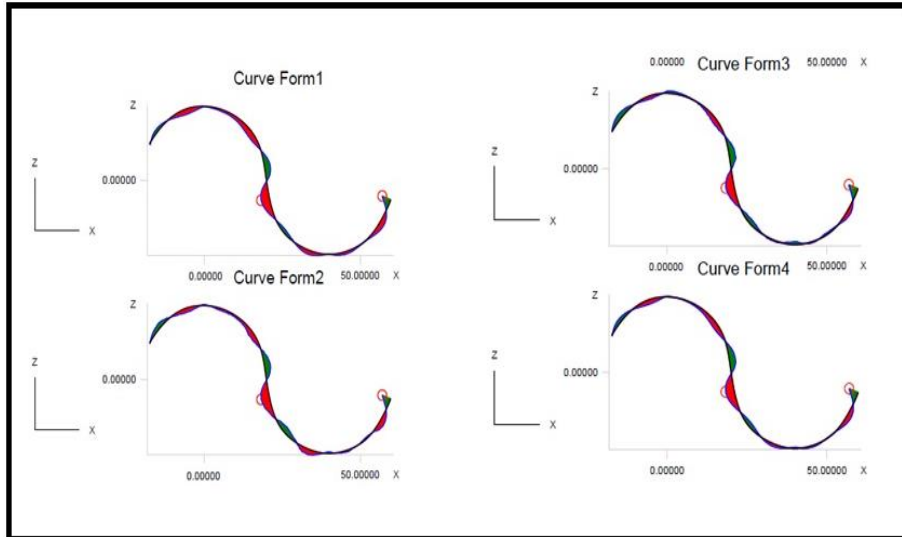
Equação 18: $R_{efcmax} = R_f \cdot \sin(\phi_4)$

3 – Resultados e discussões

3.1 – Erro de forma

O erro de forma encontrado para todas as trajetórias no plano xy foi de 0,8mm, o que nos diz que os parâmetros utilizados não influenciaram para a geometria escolhida e o material usado no experimento. A figura 8 mostra os erros de forma do corpo de prova no plano xz, nota-se um padrão de comportamento muito semelhante para as quatro regiões fresadas.

Figura 8 – Perfil do erro de forma para as quatro trajetórias



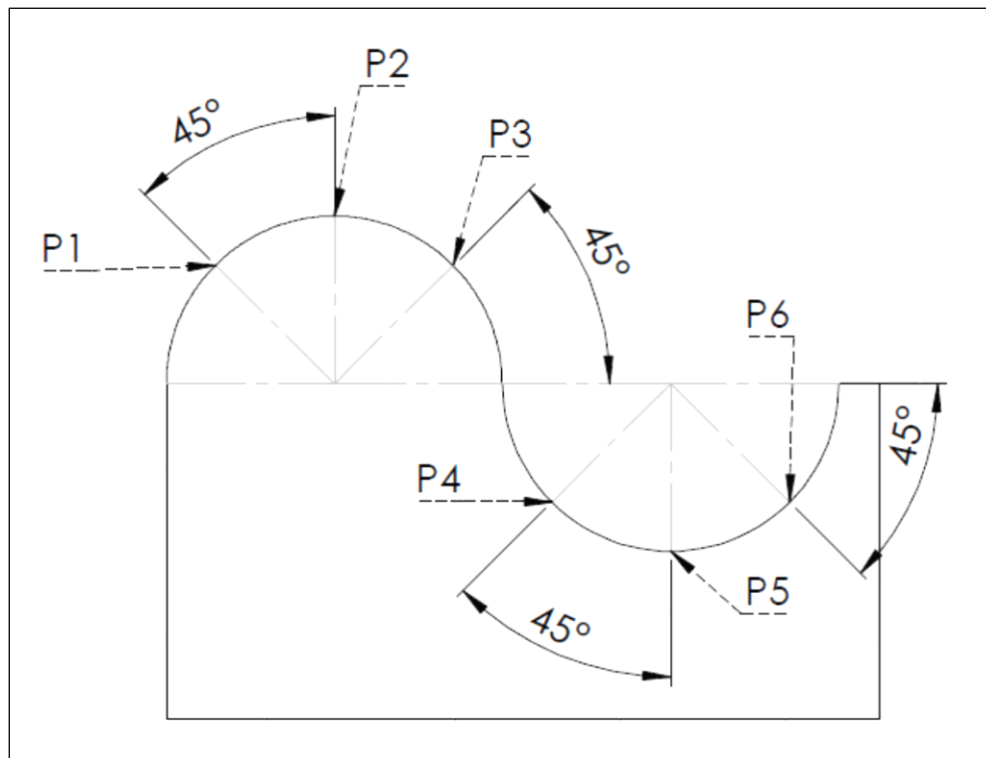
3.2 – Velocidade efetiva de corte

Na tabela 4 estão descritos os diâmetros e velocidades efetivas de corte, assim como a variação da velocidade efetiva referente aos pontos representados na figura 9. Os valores da velocidade efetiva de corte são calculados a partir da equação 1, enquanto os diâmetros efetivos através das equações 15, 16, 17 e 18.

Tabela 4 – Diâmetros e velocidades efetivas

Ponto	Efetivo (mm)		Velocidade de corte (m/min)		Variação da Velocidade
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	
1	4,24	5,84	73,26	100,91	27,65
2	0,00	5,10	0,00	88,12	88,12
3	1,40	4,24	24,19	73,26	49,07
4	4,24	4,84	73,26	83,63	10,37
5	0,00	3,54	0,00	61,17	61,17
6	4,24	5,92	73,26	102,29	29,03

Figura 9 – Pontos estudados



3.3 – Rugosidade

A tabela 5 mostra os resultados de Ra para os pontos 1, 2 e 3, o menor Ra foi 0,6 μm , em que a $V_{\text{max}} = 100,9 \text{ m/min}$, sentido de corte concordante e menor balanço da ferramenta, enquanto o maior Ra foi de 5,75 μm para o ponto com sentido de corte discordante, maior balanço da ferramenta e $V_{\text{max}} = 73,26 \text{ m/min}$, segundo Souza et al, quanto maior a velocidade de corte, menor é a rugosidade da superfície.

Segundo Souza et al, espera-se que o sentido concordante tenha um melhor resultado com relação ao sentido discordante e que o menor balanço tenha um melhor resultado com relação ao maior balanço. O diagrama mostrado na figura 9 mostra os resultados esperados, onde a trajetória D é a trajetória de menor rugosidade e a trajetória B a maior. O valor da rugosidade na trajetória A poderia ser tanto maior que a trajetória B, quanto menor, já que a única restrição para as duas trajetórias é que ambos tenham valores de rugosidade menores que as oferecidas pela trajetória B e maiores que a trajetória D.

As trajetórias A e D tem o mesmo balanço, porém sentidos de corte diferente, assim como as trajetórias B e C, nota-se que o sentido concordante para ambos os casos possui menor rugosidade superficial

Figura 9 - Posições esperadas das trajetórias

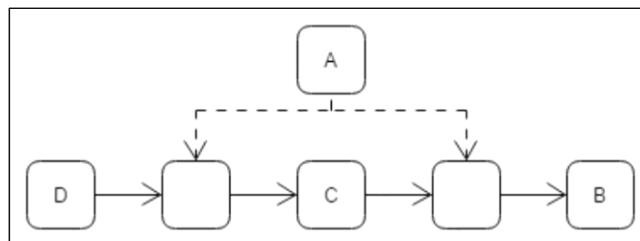


Tabela 5 – Rugosidade e variação da velocidade

Trajetoária	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
	$\Delta v = 27,65\text{m/min}$	$\Delta v = 88,12\text{m/min}$	$\Delta v = 49,07\text{m/min}$
	Ra [μm]	Ra [μm]	Ra [μm]
A	0,89	2,17	1,23
B	1,77	2,16	5,75
C	1,44	2,46	4,24
D	0,6	1,86	0,8
Sequência Crescente (Ra)	D-A-C-B	D-B-A-C	D-A-C-B

As trajetórias B e C possuem maior balanço da ferramenta, com isso a rigidez ferramenta se torna menor e a ponta tende a vibrar mais do que as trajetórias A e D. Para trajetórias descendentes em superfícies convexas a peça usinada está do lado oposto ao sentido da velocidade, fazendo com que ocorra mais vibração nesta região, por isso o ponto 3 para as trajetórias B e C obtiveram uma rugosidade tão superior aos demais pontos. As trajetórias A

e D possuem um balanço menor, e por sua vez, maior rigidez e menor amplitude de vibração, não sendo tão significativo no ponto 3 como para as demais trajetórias.

4 – Conclusão

Este trabalho contribuiu para o estudo da usinagem em superfícies complexas inserindo uma ferramenta para analisar a velocidade máxima e mínima efetiva de corte.

As análises realizadas mostraram que em uma superfície descendente, a influência do balanço da ferramenta, dependendo de sua dimensão, pode não ser relevante sob a ação da velocidade de corte. Conhecemos individualmente como os parâmetros interagem com a qualidade superficial da peça usinada, nos falta quantificar cada parâmetro para poder relacioná-los.

Em um estudo futuro, se deseja analisar uma geometria semelhante, diminuindo gradativamente a diferença entre os comprimentos dos balanços da ferramenta, para buscar quantificar esse parâmetro.

5 - Referências

ANTONIADIS, A. et al. Prediction of surface topomorphy and roughness in ball-end milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 21, n. 12, p. 965-971, 2003.

DANG, Jian-Wei et al. Cutting force modeling for flat end milling including bottom edge cutting effect. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 50, n. 11, p. 986-997, 2010.

DE SOUZA, Adriano Fagali et al. Influences of the tool path strategy on the machining force when milling free form geometries with a ball-end cutting tool. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, p. 1-13, 2015.

DE SOUZA, Adriano Fagali et al. Investigating the cutting phenomena in free-form milling using a ball-end cutting tool for die and mold manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 71, n. 9-12, p. 1565-1577, 2014.

DE SOUZA, Adriano Fagali et al. Evaluating the Roughness According to the Tool Path Strategy When Milling Free Form Surfaces for Mold Application. *Procedia CIRP*, v. 14, p. 188-193, 2014.

DINIZ, Anselmo Eduardo; NEVES, Davi. O Fresamento de material endurecido com fresa de ponta esférica—análise da influência dos parâmetros de usinagem de desbaste na força de corte. In: *CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO*. 2003. p. 2003.

Sandvik. “Manual Técnico de Usinagem”, Sandvik Coromant, São Paulo, 2012.

VOPÁT, Tomáš et al. The Influence of Different Types of Copy Milling on the Surface Roughness and Tool Life of End Mills. *Procedia Engineering*, v. 100, p. 868-876, 2015.