

INFLUÊNCIA DO CENTRO DA PONTA DA FRESA ESFÉRICA NA USINAGEM PLANAR COM MATERIAIS DE DIFERENTES DUREZAS E ÂNGULOS DE CONTATO NA QUALIDADE SUPERFICIAL

Miguel Dias Júnior, miguel.dias.jr@gmail.com¹

Adriano Fagali de Souza, adriano.fagali@ufsc.br¹

Thiago Antônio Fiorentin, thiago.antonio@ufsc.br¹

¹ Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC – Campus Joinville, Rua Presidente Prudente de Moraes, 406, Joinville – SC - CEP 89218-000.

Resumo: Na usinagem de moldes e matrizes, devido à característica complexa da geometria imposta a peça, a utilização de fresas de ponta esférica faz-se necessária devido à incidência do constante contato da ponta esférica da ferramenta em diferentes ângulos, tangenciando as superfícies sinuosas da peça, que são constituídas de diversas splines. Ao longo dos anos, diversos pesquisadores têm afirmado que o centro da fresa de ponta esférica em contato com a superfície usinada é prejudicial à qualidade superficial, devido ao escoamento plástico do material em contato com o centro da fresa sobrepujar a deformação ao cisalhamento. No entanto, nos últimos dois anos surgiram divergências dessa afirmativa, quando a dureza do material é próxima dos 60 HRC. Muitas pesquisas foram realizadas sobre a melhor direção e sentido de corte na usinagem de superfícies complexas com fresa de ponta esférica, porém cada pesquisador investigou separadamente um tipo de material e dureza. Com base nesses trabalhos, é necessário determinar a influência do ângulo de inclinação e dureza do material, a fim de mensurar essas correlações. Foram avaliadas as superfícies planares no sentido descendente e direção concordante em dois ângulos de inclinação da superfície: 5° com o centro da fresa em contato com o material e 85° quando a fresa corta o material próximo ao seu diâmetro nominal. Também avaliou-se a influência da dureza do material na ocorrência de vibrações em relação a posição de contato da aresta cortante da fresa, com duas durezas distintas: 32 HRC e 60 HRC aproximadamente. Apesar da afirmativa mais recente de que o centro é benéfico para materiais próximos a 60 HRC, os resultados mostraram que o centro da ferramenta é sempre prejudicial, independente da dureza do material.

Palavras-chave: fresa de ponta esférica, ângulo de inclinação, dureza do material, rugosidade superficial

1. INTRODUÇÃO

A demanda por bens de consumo duráveis com geometrias mais atraentes tem se intensificado nos últimos anos, o que tem levado a inserção de geometrias complexas nos vários processos de fabricação. No fresamento de moldes e matrizes as cavidades com geometrias complexas são cada vez mais latentes. Segundo De Souza et al, (2014) as superfícies complexas são utilizadas pelos designers devido a demanda do mercado por formas mais atraentes.

De Souza e Ulbrich (2013) definem geometrias complexas como aquelas não passíveis da representação matemática convencional, como retas e circunferências ou geometrias tridimensionais primitivas como formas cúbicas, esféricas, toroidais, cônicas, planas e cilíndricas. São geometrias que alteram a curvatura ao decorrer da entidade de forma não uniforme, sendo que cada ponto possui um raio de curvatura distinto e independente dos adjacentes, tendo o termo *spline* como referência para o equacionamento matemático da curva complexa. A representação matemática da curva complexa foi possível pelo equacionamento desenvolvido por *Hermite* e mais recentemente, para a aplicação computacional por *Pierre Bézier* e *Lagrange*, na década de 70.

No fresamento de moldes e matrizes com geometrias complexas há a necessidade da utilização de fresas de ponta esférica, pois as mesmas permitem o contínuo contato da aresta cortante da ferramenta tangenciando as superfícies sinuosas das cavidades a serem usinadas. De acordo com Chiang et al, (1995) as fresas de ponta esférica são ferramentas que permitem uma melhor condição de contato da ferramenta de corte com a superfície usinada.

No entanto, por diversas vezes quando se usina cavidades com formas complexas, inevitavelmente o centro da fresa de ponta esférica entra em contato com a superfície do material usinado durante o percurso de corte, ocasionando alterações da rugosidade superficial.

A qualidade superficial é primordial na manufatura de moldes e matrizes, pois quanto mais for otimizada a rugosidade no fresamento, menor será o tempo despendido no processo de polimento.

De acordo com Souza et al, (2014) o fresamento é o principal processo de usinagem da indústria, no entanto, devido a algumas limitações desse processo, a rugosidade superficial requerida pela manufatura do molde é somente alcançada por meio do polimento manual, o que acaba por trazer inconvenientes de aumentos de custos, aumento de tempo e erros geométricos.

De Lacalle et al, (2002) afirmam que 65% do tempo total de manufatura é consumido com usinagem e polimento, que frequentemente é realizado manualmente e pode chegar até a 30% do tempo total do processo de manufatura de um molde. Desta forma é necessário que o processo de usinagem por fresamento proporcione uma rugosidade superficial que reduza ao máximo a necessidade de um posterior polimento da peça.

Houming, Chengyong e Zhenyu, (2008) também delineiam que no processo tradicional de usinagem, devido sua baixa eficiência e qualidade, o acabamento é realizado pelo processo de usinagem por eletroerosão e processo manual de polimento. No entanto essas operações estão sendo substituídas atualmente pela tecnologia de usinagem em altas velocidades.

De Souza et al, (2015) quantificou a influência do ângulo de inclinação e contato do centro da fresa de ponta esférica na região do corte, utilizando o material AISI P20 com 30 HRC de dureza. Para isso foi investigada a força de corte e suas componentes através de análise de variância (ANOVA) variando o sentido de corte (ascendente e descendente), a estratégia (concordante e discordante), velocidade de corte e o ângulo de inclinação da peça em relação a fresa de ponta esférica, na usinagem de uma geometria circular de um quarto de cilindro com 27 mm de diâmetro, representando a usinagem de forma complexa.

De acordo com os autores, na usinagem de forma complexa o tipo de fresamento muda de fresamento de topo para fresamento radial com a fase de transição de ambos os tipos. Devido a alteração de contato ao longo do percurso de corte, o sentido da força também se altera, fazendo com que haja a alternância da deflexão sobre a ferramenta, o que gera desvios geométricos sobre a superfície da peça usinada (SOUZA et al, 2015).

O fresamento de geometrias complexas com fresa de ponta esférica diferencia-se do fresamento de topo convencional com a fresa perpendicular à superfície usinada, pois a ferramenta adota constantemente diversas inclinações, por este motivo, diferentes autores têm pesquisado o fresamento de formas complexas pela representação de uma circunferência, onde a ferramenta se desloca das proximidades do centro da fresa (assemelhando-se a um fresamento frontal) às proximidades do diâmetro nominal (assemelhando-se a um fresamento tangencial) ou inclinações de superfícies planas, adotando inclinações próximas ao diâmetro nominal da ferramenta e inclinações próximas ao centro da ferramenta.

Quando se fresa uma geometria de formas complexas empregando fresas de ponta esférica, o centro da ferramenta de corte entra em contato com a superfície da peça, o que faz com que a velocidade de corte da ferramenta seja nula. Esse fato faz com que a fricção da aresta de corte venha sobrepujar o esmagamento do material em relação ao corte, predominando a deformação plástica sobre o cisalhamento do material (Tuysuz, Altintas e Feng, 2013). Essa deformação prejudica a qualidade superficial da peça, já que consequentemente aumenta o tempo de polimento da superfície (De Souza et al, 2014).

No entanto, Scandiffio, Diniz e De Souza, (2015) usinando uma superfície circular e planares com inclinações de 5°, 45° e 85° em um aço D6 endurecido com 60 HRC, contradisseram a afirmação de que o centro da fresa de ponta esférica é prejudicial à rugosidade superficial. Segundo os autores, quando o centro da ponta da ferramenta está em contato com o material, obtém-se maior rigidez, reduzindo as vibrações causadas pelas baixas frequências, contrariando diversos autores sobre a instabilidade de amplitudes vibracionais que prejudicam a rugosidade, quando o centro da fresa está em contato com a superfície do material nessa condição.

Liu, Loftus e Whitten, (2005) afirmam que é necessária uma maior investigação sobre as condições de contato entre o centro da ponta da fresa esférica e a superfície do material, em particular a deformação resultante da superfície fresada. A deformação elástica e plástica é causada porque a mínima espessura de corte (hm) necessária para o cisalhamento do material, não é alcançada. (Bissacco e Hansen, 2006; Ducobu, Filippi e Rivière-Lorphèvre, 2009).

Outro fator que desencadeia a instabilidade no processo de usinagem é a flutuação das componentes da força de corte que de acordo com Polishetty et al, (2014) um período grande de flutuação da força de corte (força dinâmica) causa vibrações na ferramenta que podem levar a falha prematura da mesma. As vibrações são prejudiciais ao processo de usinagem, pois podem causar desvios dimensionais da geometria da peça e ondulações que contribuem para o detrimento da qualidade superficial da superfície usinada. De acordo com Benardos e Vosniakos, (2003) um dos fatores nos erros de forma e ondulações superficiais são causados pela vibração.

Wojciechowski, Twardowski e Pelic, (2014) igualmente afirmam que durante o processo de fresamento de superfícies inclinadas com fresa de ponta esférica os deslocamentos causados por vibração são determinados nas direções: perpendicular ao eixo de rotação da ferramenta e colinear ao vetor do movimento de avanço (X), perpendicular ao eixo de rotação da ferramenta e ao vetor do movimento de avanço (Y), paralelo ao eixo de rotação da ferramenta (Z).

Erdim, Lazoglu e Ozturk, (2006) afirmam que a deflexão da ferramenta de corte resulta em significantes erros geométricos. Desta forma, para minimizar a deflexão, a rigidez da ferramenta em relação ao balanço e o diâmetro, juntamente com a profundidade axial de corte (ap) e a profundidade radial de corte (ae) devem estar bem relacionados. A correta escolha desses parâmetros reduz a força de corte e minimiza a deflexão (Saffar et al, 2008).

Os parâmetros de corte devem estar bem correlacionados para minimizar as vibrações e deflexões da ferramenta. (Çolak, 2007; Vivancos, 2004) afirmam que a velocidade de corte, o avanço, a profundidade axial de corte e a força de corte são efetivos na rugosidade superficial.

Desta forma, é imprescindível que os parâmetros de corte estejam bem ajustados ao processo, juntamente com o percurso de deslocamento da ferramenta de corte. Ramos, Relvas e Simões (2003) descrevem que a escolha adequada do percurso da ferramenta no fresamento pode propiciar uma redução nos custos de produção e melhorar a rugosidade superficial. De Lacalle et al, (2004) também abordam que os erros dimensionais na usinagem com fresa de ponta esférica, são afetados pelas estratégias de corte e inclinação superficial da peça.

Outro elemento que tem relação direta com a qualidade superficial e a maior ocorrência de vibrações no processo de usinagem é o comprimento de balanço da ferramenta cortante. Kolluru, Axinte e Becker, (2013) encontraram diferentes frequências naturais para a mesma ferramenta em diferentes alturas de fixação da ferramenta.

Sendo assim, o comprimento de balanço, deve ser o menor possível para que a frequência natural do conjunto de fixação da ferramenta seja alta e dificulte a ocorrência de ressonância e prejudique a qualidade superficial e dimensional ou até mesmo o comprometimento ou quebra da ferramenta.

Com base nesse contexto, este trabalho estudará a influência da usinagem com ferramentas de ponta esférica nos sentidos de corte descendente, e direção de corte concordante em diferentes durezas de material. A configuração do trabalho será aplicada da seguinte forma:

Posição de contato da aresta de corte da fresa de ponta esférica em duas posições para usinar uma superfície plana de 5° obtendo-se a condição de contato com o centro da ferramenta atuando no corte e 85° para representar a condição de fresamento quando o centro da ferramenta não participa do corte. A influência da dureza do material na qualidade superficial em relação a posição de contato da aresta cortante da fresa de ponta esférica, com duas durezas distintas entre, 32 HRC e 60 HRC, aproximadamente.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O parâmetro de rugosidade adotado no experimento foi o R_z, por melhor representar os desvios entre picos e vales (LIU, 2006; STEPHENSON, 2016).

A rugosidade coletada foi mensurada em três réplicas.

Os parâmetros de corte do processo foram pré-estabelecidos e mantidos durante o experimento, sendo tratados como variáveis de controle, foram eles:

- Velocidade de corte, (vc): 123 m/min;
- Avanço por aresta, (fz): 0,1 mm/rev;
- Profundidade de corte axial, (ap): 0,5 mm;
- Profundidade de corte radial (ae): 0,25 mm.

A velocidade de corte foi selecionada dentro da faixa de indicação do catálogo de fabricantes para usinar ambos os materiais (P20 e D6), e de forma que não coincidissem com a frequência natural do conjunto de fixação fresa e cone porta-piças. Para isso, utilizou-se a Eq. 1.

$$f = \frac{n \cdot Z}{60} \quad (1)$$

Onde:

n é a rotação do eixo árvore da máquina;

Z é o número de arestas cortantes da ferramenta.

O comprimento de balanço da ferramenta utilizada foi de 33 mm, o máximo interno permitido pelo cone porta-piças, uma vez que a fresa tem no total 150 mm de comprimento, deixando a ferramenta a mais rígida possível, para aumentar a frequência natural do conjunto de fixação, dificultando a ocorrência de vibrações produzidas por ressonância do conjunto montado.

Para o cálculo da força de usinagem (F_u), utilizou-se a Eq. (2).

$$F_u = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (2)$$

Onde:

F_x é a componente da força de usinagem na direção do eixo X;

F_y é a componente da força de usinagem na direção do eixo Y;

F_z é a componente da força de usinagem na direção do eixo Z.

Fonte: (Eric, Stahl Jan, 2012)

O experimento foi realizado em um centro de usinagem CNC Romi D600 de três eixos.

2.1. Geometria do Corpo de Prova

A geometria planar, conforme Fig. (1), foi escolhida por representar a influência do contato do centro da fresa de ponta esférica, para o ângulo de 5° e a ausência do centro da ponta da ferramenta, no ângulo de 85°, que na usinagem de uma superfície de geometria complexa, adota constantemente as inclinações desses valores extremos, devido a constante variação do diâmetro efetivo da ferramenta de corte, conforme o estudo realizado por Scandiffio, Diniz e De Souza, (2015). Para isso, foi usinada uma base com as dimensões do dinamômetro Kistler modelo 9257BA, para fixação das placas de aço P20 e D6 nas inclinações de 5° e 85°.

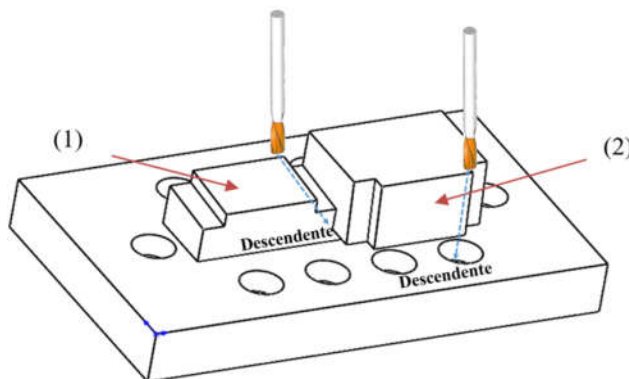


Figura 1. Esquema do procedimento experimental com inclinação da superfície em 5° e 85° (procedimento 1 e 2, respectivamente).

Foi utilizado o sentido descendente de corte para se obter a condição de contato com o centro da ferramenta atuando no corte, para a fixação a 5° do plano horizontal, já que o sentido ascendente nessa condição não teria a atuação do centro da ponta da fresa esférica no material.

Para isso, foi desenvolvida a Eq. (3).

$$\cos^{-1} \alpha = \left(\frac{R_{nom} - a_p}{R_{nom}} \right) \quad (3)$$

Onde:

R_{nom} é o raio nominal da fresa de ponta esférica;

a_p é a profundidade axial de corte;

α é o ângulo formado entre o contato do raio máximo ao mínimo da fresa de ponta esférica.

$$\beta = \theta - \alpha \quad (4)$$

Onde:

β é o ângulo resultante da subtração entre θ e α ;

θ é o ângulo de inclinação da peça.

Para sentido descendente, β positivo de min. 0° a máx. 90°, 3º quadrante em relação a ferramenta.

$$R_{max} = R_{nom} \cdot \sin \theta \quad (5)$$

$$R_{min} = R_{nom} \cdot \sin \beta \quad (6)$$

As equações de R_{min} torna-se R_{max} (vice e versa) quando a aresta cortante da ferramenta invade o 4º quadrante em relação a ferramenta, exemplo para o ângulo de inclinação em 5° no sentido descendente de corte, quando o centro da fresa de ponta esférica entra em contato com a superfície do material usinado.

O raio máximo (R_{max}) Eq. (5) e mínimo (R_{min}) Eq. (6) de contato da fresa de ponta esférica em relação a superfície de usinagem é demonstrado na Fig. (2).

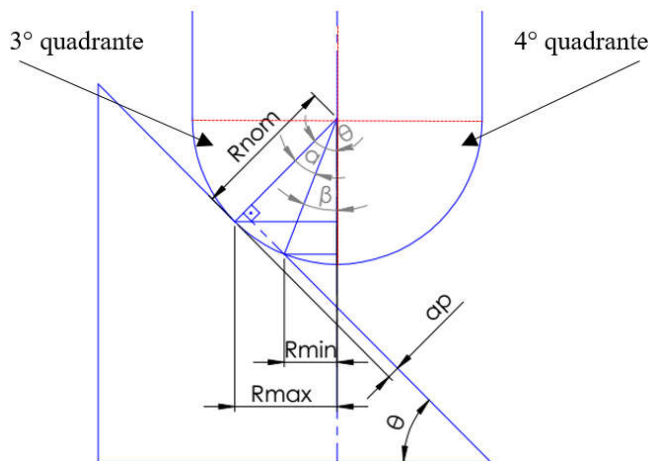


Figura 2. Esquema de contato do raio da fresa em relação a superfície angular.

Foram fabricadas duas placas intercambiáveis de aço AISI P20 com 32 HRc de dureza e AISI D6 endurecido com 60 HRc, para montagem sobre a base nas inclinações de 5° e 85°, para a usinagem do experimento.

Foi utilizada uma fresa de ponta esférica de metal duro micro grão (WC = 90, Co = 10) com revestimento TiSiN, diâmetro de 6 mm, 2 arestas cortantes com hélices de 35°, comprimento útil de 20 mm e comprimento total de 150 mm.

2.2. Equipamentos Utilizados

Para a aquisição das componentes da força de usinagem foi utilizado um dinamômetro Kistler modelo 9257BA, Fig. (3), com um amplificador de carga Kistler 5233A1 de até 10 KN e filtro anti-aliasing de 7 KHz, juntamente com o software Lab View, para o processamento dos sinais. Para mensurar a rugosidade superficial, foi utilizado um rugosímetro portátil digital SJ-210 Mitutoyo série 178-561-02A.

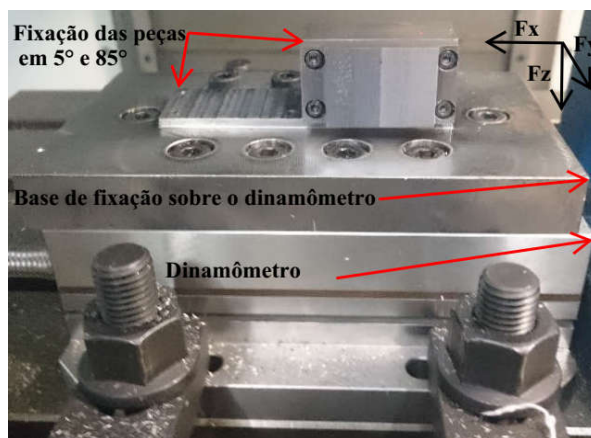


Figura 3. Base do procedimento experimental com inclinação da superfície em 5° e 85° montada sobre o dinamômetro.

Para a coleta da frequência natural do balanço das ferramentas, foi utilizado um acelerômetro de 0,6 gramas, juntamente com um martelo de impacto, conforme Fig. (4).

A frequência de excitação de cada aresta da fresa ($Z = 2$) usinando com 6525 revoluções por minuto foi de 217,5 Hz, obtido pela Eq. (1).



Figura 4. Coleta da frequência natural do balanço das ferramentas com o auxílio de um acelerômetro e martelo de impacto.

A velocidade de corte foi selecionada de forma que não coincidissem com as harmônicas da frequência natural da ferramenta em seu respectivo comprimento de balanço, Fig. (5).



Figura 5. Frequência natural do conjunto de fixação do cone porta-pinças e ferramenta em 33 mm.

Utilizando a Eq. (3) até a Eq. (6), tem-se as velocidades de corte atuantes em cada ponto de contato da ferramenta com a inclinação do material em seus respectivos diâmetros mínimos e máximos, Tab. (1).

Tabela 1. Diâmetro efetivo em contato e velocidade de corte do experimento nas inclinações de 5° e 85°.

Inclinação de 5°		
Ø da fresa	Descendente (mm)	Vc (m/min)
Dnom	6	123
Dmax	2,86	58,7
Dmin	0	0*
Inclinação de 85°		
Ø da fresa	Descendente (mm)	Vc (m/min)
Dnom	6	123
Dmax	5,98	122,6
Dmin	4,69	96,14

* Centro da fresa de ponta esférica em contato com a superfície da peça.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O contato do centro da fresa de ponta esférica provavelmente fez sobrepujar o esmagamento do material no centro da ferramenta sob a formação do cavaco, resultando em uma grande força axial de corte (F_z), que na condição descendente concordante para o balanço de 33 mm na inclinação de 5° foi cerca de 51 N para o aço P20 (DC5°33-P20) e cerca de 189 N para o D6 (DC5°-33-D6), Fig. (6).

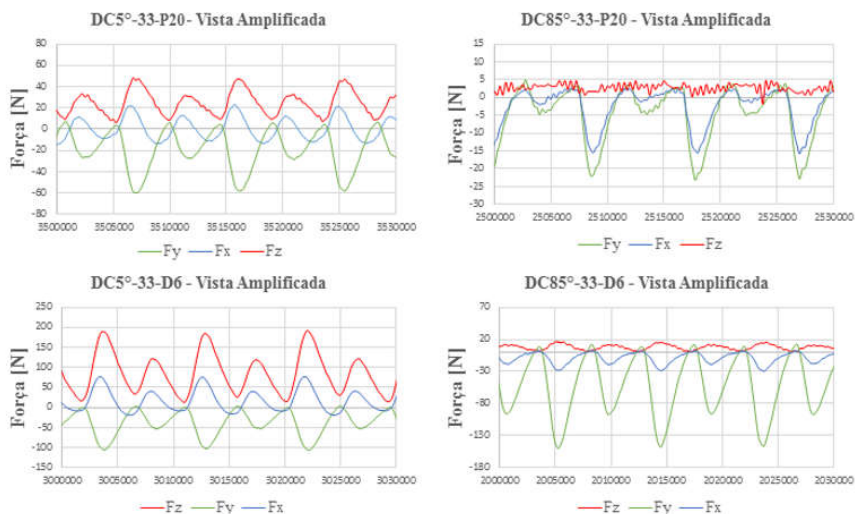


Figura 6. Componentes da força de usinagem para o aço AISI P20 e AISI D6 no comprimento de balanço 33 mm.

Já na inclinação de 85° (DC85°-33-P20 e DC85°-33-D6), onde a componente F_z da força teve uma atuação praticamente nula, alcançou-se uma rugosidade superficial menor em relação a inclinação de 5° , Tab. (2).

Tabela 2. Rugosidade R_z (μm) no sentido descendente e direção concordante, para o aço AISI P20 e AISI D6.

Inclinação ($^\circ$)	Material da Peça	R_z (μm)	Desvio Padrão (μm)
5	P20	7,87	0,13
85	P20	4,56	0,82
5	D6	4,69	0,31
85	D6	2,53	0,12

A proporção do aumento da rugosidade R_z quando o centro da ferramenta manteve-se em contato com o material foi de aproximadamente 73% para o aço P20 e aproximadamente 85% para o D6.

A força de usinagem, obtida pela Eq. (2), para a condição descendente concordante na inclinação de 5° , quando o centro da ponta da fresa esférica participou do corte, e para a condição descendente concordante na inclinação de 85° , quando o centro da ponta da fresa esférica não participou do corte, podem ser vistas na Tab. (3), para ambos os materiais.

Tabela 3. Força de usinagem (N) no sentido descendente e direção concordante, para o aço AISI P20 e AISI D6.

Inclinação ($^\circ$)	Material da Peça	Força de Usinagem (N)
5	P20	81,19
85	P20	28,03
5	D6	229,05
85	D6	153,67

A proporção do aumento da força de usinagem com a presença do centro em contato com a superfície do material foi de aproximadamente 190% para o aço AISI P20 e aproximadamente 49% para o aço AISI D6.

O centro da ferramenta em contato com o material na inclinação de 5° diminuiu a qualidade superficial da peça fresada. Essa condição é prejudicial, pois a velocidade periférica no centro da ponta da ferramenta é nula e a velocidade de corte nas vizinhanças é menor em relação a inclinação de 85°, onde o centro da ponta da fresa não atua.

Tal condição possivelmente potencializou a deformação plástica do material sobre o cisalhamento, o que provavelmente ocasionou maiores amplitudes vibracionais que levaram a flexão da ferramenta e ao aumento da força de usinagem, uma vez que na região central da ferramenta o material é esmagado, por não possuir uma velocidade de corte o suficiente para que ocorresse o cisalhamento, o que por certo contribuiu para o aumento da rugosidade superficial nesse contato.

Diferente do afirmado por Scandiffio, Diniz e De Souza, (2015) o centro da ponta da fresa esférica foi prejudicial quando em contato com o material, mesmo para o aço endurecido AISI D6.

4. CONCLUSÃO

Através dos resultados do experimento, chegou-se à conclusão de que o centro da fresa de ponta esférica em contato com o material demonstrou ser a pior condição para a qualidade superficial, independente da dureza do material, alcançando os maiores resultados sob tal condição. A proporção do aumento da rugosidade com a presença do centro da fresa de ponta esférica no material foi de aproximadamente 73% para o aço AISI P20 e cerca de 85% para o aço AISI D6.

A presença do centro da ponta da fresa esférica em contato com a superfície do material, aumentou a força de usinagem em aproximadamente 190% para o aço AISI P20 e aproximadamente 49% para o aço AISI D6. Esse aumento provavelmente levou a maiores amplitudes vibracionais sob tal contato, contribuindo para a maior flexão da ferramenta e consequentemente a deterioração da rugosidade superficial.

Para trabalhos futuros pretende-se utilizar uma análise fatorial para a saída da rugosidade superficial, com os fatores de inclinação, comprimento de balanço, dureza do material, sentido e direção de corte em dois níveis (2^5), para maior investigação da influência do centro da fresa de ponta esférica na resposta da qualidade superficial.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao professor Joel Martins Crichigno Filho, que cedeu de seu tempo, espaço e equipamentos na Universidade do Estado de Santa Catarina – Joinville, para a aquisição das componentes da força de usinagem e rugosidade. Os autores também agradecem ao Diretor Comercial Durval Böge da empresa Tupytec que realizou o tratamento térmico das peças sem custos, para a realização do trabalho proposto.

6. REFERÊNCIAS

- Benardos, P. G.; Vosniakos, G.C. "Predicting surface roughness in machining: a review". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 43, n. 8, p. 833-844, 2003.
- Bissacco, G. Hansen, H. N., De Chiffre, L. "Size effects on surface generation in micro milling of hardened tool steel". *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, v. 55, n. 1, p. 593-596, 2006.
- Chiang, S.; Tsai, C. M.; Lee, A. C. "Analysis of cutting forces in ball-end milling". *Journal of Materials Processing Technology*, v. 47, n. 3-4, p. 231-249, 1995.
- Çolak, O.; Kurbanoglu, C.; Kayacan, M. C. "Milling surface roughness prediction using evolutionary programming methods". *Materials & design*, v. 28, n. 2, p. 657-666, 2007.
- De Souza, A. F.; Ulbrich, C. B. L. "Engenharia integrada por computador e sistemas CAD/CAM/CNC: Princípios e aplicações". 2. ed. São Paulo: Artliber, 2013. 59 p.
- De Souza, A. F.; Machado, A.; Beckert, S. F.; Diniz, A. E. "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.
- De Souza, A. F.; Berkenbrock, E.; Diniz, A. E.; Rodrigues, A. R. "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*, v. 37, n. 2, p. 675-687, 2015.
- De Lacalle, L. N. L.; Lamikiz, A.; Arana, J.L. "Improving the surface finish in high speed milling of stamping dies". *Journal of Materials Processing Technology*, v. 123, n. 2, p. 292-302, 2002.
- De Lacalle, L. N. L.; Lamikiz, A.; Sanchez, J. A.; Salgado, M. A. "Effects of tool deflection in the high-speed milling of inclined surfaces". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 24, n. 9-10, p. 621-631, 2004.
- Ducobu, F.; Filippi, E.; Rivière-Lorphèvre, E. "Chip formation and minimum chip thickness in micro-milling". In: *Proceedings of the 12th CIRP conference on modeling of machining operations*. 2009. p. 339-346.
- Erdim, H.; Lazoglu, I.; Ozturk, B. "Feedrate scheduling strategies for free-form surfaces". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 46, n. 7, p. 747-757, 2006.

- Eric, S. J., 2012. "Metal cutting theories and models", Ed. Elanders Seco Tools, A. B Division of Production and Materials Engineering, Lund, Sweden, 105 p.
- Houming, Z.; Chengyong, W.; Zhenyu, Z. "Dynamic characteristics of conjunction of lengthened shrink-fit holder and cutting tool in high-speed milling". Journal of materials processing technology, v. 207, n. 1, p. 154-162, 2008.
- Kolluru, K.; Axinte, D.; Becker, A. "A solution for minimising vibrations in milling of thin walled casings by applying dampers to workpiece surface". CIRP Annals-Manufacturing Technology, v. 62, n. 1, p. 415-418, 2013.
- Liu, N.; Loftus, M.; Whitten, A. "Surface finish visualisation in high speed, ball nose milling applications". International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 45, n. 10, p. 1152-1161, 2005.
- Polishetty, A.; Goldberg, M.; Littlefair, G.; Puttaraju, M.; Patil, P.; Kalra, A. "A Preliminary Assessment of Machinability of Titanium Alloy Ti 6AL 4V During thin Wall Machining Using Trochoidal Milling". Procedia Engineering, v. 97, p. 357-364, 2014.
- Ramos, A. M.; Relvas, C.; Simões, J. A. "The influence of finishing milling strategies on texture, roughness and dimensional deviations on the machining of complex surfaces". Journal of Materials Processing Technology, v. 136, n. 1, p. 209-216, 2003.
- Saffar, R. J.; Razfar, M. R.; Zarei, O.; Ghassemieh, E. "Simulation of three-dimension cutting force and tool deflection in the end milling operation based on finite element method". Simulation Modelling Practice and Theory, v. 16, n. 10, p. 1677-1688, 2008.
- Scandiffio, I.; Diniz, A. E.; De Souza, A. F. "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, p. 1-12, 2015.
- Tuysuz, O.; Altintas, Y.; Feng, H.Y. "Prediction of cutting forces in three and five-axis ball-end milling with tool indentation effect". International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 66, p. 66-81, 2013.
- Vivancos, J.; Luis, C. J.; Costa, L.; ORTIZ-MARZO, J. A. "Optimal machining parameters selection in high speed milling of hardened steels for injection moulds". Journal of Materials Processing Technology, v. 155, p. 1505-1512, 2004.
- Wojciechowski, S.; Twardowski, P.; Pelic, M. "Cutting forces and vibrations during ball end milling of inclined surfaces". Procedia CIRP, v. 14, p. 113-118, 2014a.

7. DIREITOS AUTORAIS

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

INFLUENCE OF THE CENTER OF SPHERICAL CUTTER OF BALL-END MILL IN PLANAR MACHINING WITH MATERIALS OF DIFFERENT HARDNESS AND CONTACT ANGLES IN SURFACE QUALITY

Miguel Dias Júnior, miguel.dias.jr@gmail.com¹

Adriano Fagali de Souza, adriano.fagali@ufsc.br¹

Thiago Antônio Fiorentin, thiago.antonio@ufsc.br¹

¹ 1 Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC – Campus Joinville, Rua Presidente Prudente de Moraes, 406, Joinville – SC - CEP 89218-000.

Abstract: In mold and die machining, due to the complex geometry imposed on the workpiece, the use of spherical end mills is necessary due to the constant contact of the spherical tip of the tool at different angles, tangent to the sinuous surfaces of the workpiece are composed of several splines. Over the years, several researchers have stated that the center of the spherical end mill in contact with the machined surface is detrimental to surface quality, due to the plastic flow of the material in contact with the center of the spherical end mill to overcome the shear deformation. However, in the last two years disagreements have arisen, when the hardness of the material is close to 60 HRC. Many researches were carried out on the best direction and sense of cut in the machining of complex surfaces with spherical end mill, but each researcher investigated separately a type of material and hardness. Based on these works, it is necessary to determine the influence of the angle of inclination and hardness of the material, in order to measure these correlations. Planar surfaces were evaluated in descendant direction and down milling direction at two angles of surface tilt: 5 ° with the center of the cutter in contact with the material and 85 ° when the cutter cuts the material close to its nominal diameter. The influence of the hardness of the material in the occurrence of vibrations in relation to the contact position of the cutting edge of the cutter was also evaluated, with two different hardnesses: 32 HRC and 60 HRC approximately. Despite the more recent assertion that the center is beneficial for materials close to 60 HRC, the results showed that the center of the tool is always harmful, regardless of the hardness of the material.

Palavras-chave: ball-end mill, tilt angle, material hardness, surface roughness