

COMPARAÇÃO ENTRE CENTROS DE USINAGEM CNC PARA A MICROUSINAGEM DE GEOMETRIAS COMPLEXAS

Taiuê Cavalheiro Hoffmann, taiue.hoffmann@grad.ufsc.br¹

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

Jorge Adriano dos Santos, jorge.santos@edu.sc.senai.br²

¹Universidade Federal de Santa Catarina, Câmpus Joinville; rua Presidente Prudente de Moraes, 406 - Santo Antônio, 89218-000

²Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial, Faculdade SENAI Blumenau; rua São Paulo – 1147 - Victor Konder, 89012-001

Resumo: Este trabalho apresenta um estudo sobre a utilização de dois centros de usinagem, uma microfresadora e uma máquina CNC convencional no microfresamento de formas complexas. Atualmente este processo esta se consolidando como uma excelente alternativa na substituição do processo de eletro-erosão de pequenas áreas de moldes. No entanto equipamentos específicos para microusinagem possuem custo muito elevado, a utilização de um fuso multiplicador de rotação acoplado ao eixo árvore de uma máquina CNC convencional, pode vir a ser uma alternativa economicamente viável. Este trabalho tem como objetivo realizar uma investigação sobre o comportamento de dois centros de usinagem avaliando erros geométricos e rugosidade das peças usinadas, no aço AISI P20 material vastamente utilizado pela indústria de moldes e matrizes. Foi realizada a medição do raio de aresta R_e da microfresa, obtendo-se o valor de $3 \mu\text{m}$, medição necessária para o cálculo de parâmetros de corte como f_z , os ensaios de usinagem foram conduzidos variando o sentido de corte e a direção de usinagem, em todos os ensaios foi utilizado o mesmo valor de $f_z = 20\% > R_e$. Foram utilizadas microfresas de topo esférico de metal duro, revestidas com TiSiN e $\varnothing 0,4 \text{ mm}$ com duas arestas de corte. Os resultados demonstram que a utilização de fusos multiplicadores apesar de quando utilizados apresentarem os maiores valores nos desvios geométricos (erros de forma), e sobre tudo na rugosidade, sua utilização pode ser uma alternativa econômica viável.

Palavras-chave: Microfresamento, Formas complexas, Fusos multiplicadores.

1. INTRODUÇÃO

No cenário atual da indústria de moldes e matrizes, a fabricação dos produtos com geometrias com pequenas dimensões é realizada geralmente pelo processo de EDM (*Electro Discharge Machining*). Este processo apresenta algumas ineficiências, como baixas taxas de remoção de material, necessidade de fabricar o eletrodo além de causar danos à integridade superficial do produto fabricado, elevando o tempo e custo para a fabricação do ferramental (Bodziak, 2013).

Desta forma os processos de microusinagem se apresentam como uma excelente alternativa para substituição do processo de eletro-erosão em alguns casos, onde o microfresamento tem um destaque especial devido a seu grau de versatilidade de fabricação, principalmente quando há a necessidade de se fabricar peças com dimensões pequenas (Bodziak, 2012).

No processo de usinagem é necessário atingir um valor mínimo de velocidade de corte (V_c). Esta velocidade está diretamente relacionada com o diâmetro da ferramenta e a rotação do eixo árvore. Desta forma, reduzindo o diâmetro das ferramentas, deve-se elevar a rotação do eixo árvore da máquina. Assim, faz-se necessário o uso de eixo-árvore com elevadas rotações (Kang et al 2007).

Centros de usinagem específicos para microfabricação tem custo elevado. Desta forma, a identificação do custo-benefício, por parte de uma empresa, para a aquisição destes equipamentos não é tarefa fácil. Uma alternativa atual para a aplicação de pequenas fresas é a utilização de eixos-árvore de alta rotação, acoplável no eixo-árvore da máquina CNC convencional. Segundo Baldo (2013), esta pode ser uma opção economicamente viável.

Em trabalhos anteriores foi identificado que uma microfresadora demanda mais tempo de usinagem que um centro de usinagem convencional, identificou-se também que alterando a banda de tolerância do programa gerado pelo CAM, este parâmetro tem maior influência na microfresadora do que no centro de usinagem convencional, ocasionando maior variação na velocidade de avanço e maior tempo de fabricação (Hoffmann, 2015).

Existem alguns fatores que exercem pouca influência no microfresamento, porém influenciam diretamente o corte em micro escala, como a força “*ploughing*”, que surge na interface entre cavaco e ferramenta, removendo o material por deformação plástica (Bissacco, 2005).

Simoneau, Ng e Elbestawi (2006), apontam que grande diferença entre a macrousinagem e a microusinagem é o considerável aumento da tensão limite de escoamento do material, devido à redução da área de corte, esta condição é

caracterizada como efeito escala. Este problema é resultante de alguns fenômenos que são desconsiderados na usinagem macro (convencional), porém são importantes na usinagem em microescala, como: Raio de aresta da ferramenta (que tem por consequência a formação do cavaco); Energia específica de corte; Microestrutura do material.

O fenômeno causado pelo raio de aresta da ferramenta é caracterizado como efeito escala, este ocorre quando a espessura de corte (h) se apresenta menor do que a espessura de corte não deformado (h_m) há uma compressão do material sob a aresta da ferramenta, que se recupera após a passagem da ferramenta ocasionando a deformação plástica, desse modo, não há remoção de material como cavaco. Quando espessura de corte apresenta-se igual e espessura mínima do cavaco, neste caso, parte do material é removida por cisalhamento e a outra parcela se recupera elasticamente (Chae et al 2006).

Aramcharoem et al (2008), enfatizam que este fenômeno ocorre em virtude de algumas limitações dos métodos de afiação por retificação e do tamanho dos carbonetos utilizados na fabricação das microferramentas, a aresta de corte não pode ser considerada perfeitamente afiada, deste modo, a maior espessura de corte geralmente é menor do que o raio de aresta conforme apresentado na Figura 1. Desta forma, a formação do cavaco acontece na região da aresta de corte, com ângulos negativos. Ocasionalmente o Fenômeno caracterizado como efeito escala ou efeito da espessura mínima do cavaco, que tem um grande impacto nas forças de corte, estabilidade do processo, na tensão residual e acabamento superficial da superfície usinada (Bissacco, 2004).

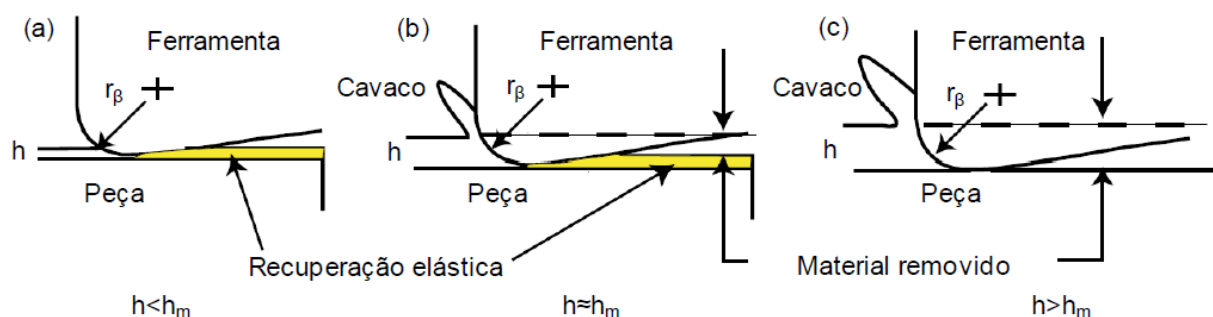


Figura 1. Esquema da espessura mínima de corte em microescala Chae et al (2006).

Desta forma, todos os parâmetros de corte desde trabalho foram escolhidos de forma para que o corte fosse feito na forma de cisalhamento. Geralmente a espessura mínima de corte é 14-43% do raio de aresta da ferramenta para algumas variações de variáveis de corte e material (Oliveira et al 2015).

G. Kiswanto (2014) variou velocidade de rotação e velocidade de avanço, foi notado que este tem maior influência sobre a qualidade de superfície. Ainda Foi verificado que quanto maior o tempo de usinagem a rugosidade da superfície é maior.

Santos (2016), estudou o microfresamento de formas complexas e identificou que o parâmetro de entrada mais influente sobre o efeito escala, foi o f_z (avanço por aresta), e quando utilizado valores de f_z menores que o raio de aresta da ferramenta notou-se o surgimento do efeito escala.

O objetivo deste trabalho é estudar o comportamento de dois centros de usinagem avaliando erros geométricos, rugosidade das peças usinadas. O estudo foi motivado, sobretudo pelo fato de a microusinagem de formas complexas ser uma área da ciência ainda muito incipiente, principalmente pois a maioria dos estudos que vêm sendo realizados nesta área, geralmente utilizam ferramentas de topo reto e são realizados em geometrias planas. A geometria em estudo representa uma forma complexa devido a alteração do ângulo da ferramenta em relação à peça.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

No presente trabalho é estudado o comportamento de dois centros de usinagem aplicados para uma operação de acabamento: i) utilização de um centro de usinagem convencional aplicado para microusinagem (ROMI D600 rotação de 7500 RPM do laboratório de fabricação da UFSC/CTJ) empregando um fuso multiplicador de rotação no eixo arvore (SPIDLE TECNODRIL® EMT90-173522-W 35.000 RPM), Figura 2(a) e, um centro de usinagem específico para microfresamento (Kern Pyramide Nano 5 eixos de 50.000 RPM do instituto FIESC-SENAI) Figura 2(b). Neste estudo são avaliados a qualidade superficial e erros geométricos.

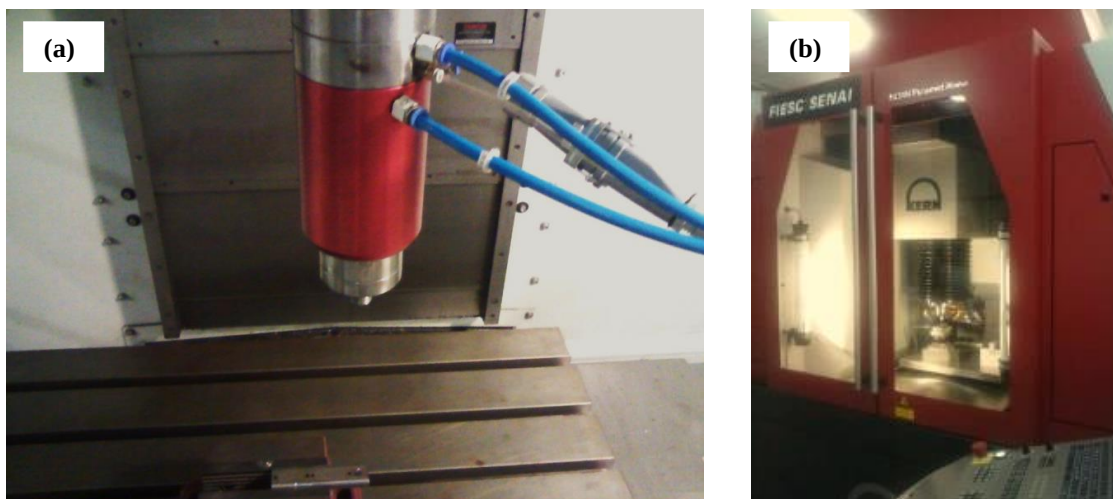


Figura 2. (a) Fuso multiplicador de rotação acoplado ao CNC convencional (b) Microfresadora.

As microfresas utilizadas para a realização dos ensaios de usinagem foram fresas de topo esférico inteiriças de metal duro, contendo duas arestas de corte e revestimento de TiSiN (Nitreto de Titânio e Silício), da marca Pan Tiger® com diâmetro de 0,4 mm, da série NaNo 600 – Metal Duro, indicada segundo fabricante para usinagem de materiais como aço Carbono, Ferro Fundido, aço Liga, aço ferramenta, aço tratado, aço soldado. De acordo com o fabricante esta ferramenta permite ainda a usinagem de materiais com dureza de até 55 HRC.

A Tabela 1 demonstra as informações referentes à geometria da ferramenta, apresentada na Figura 5.

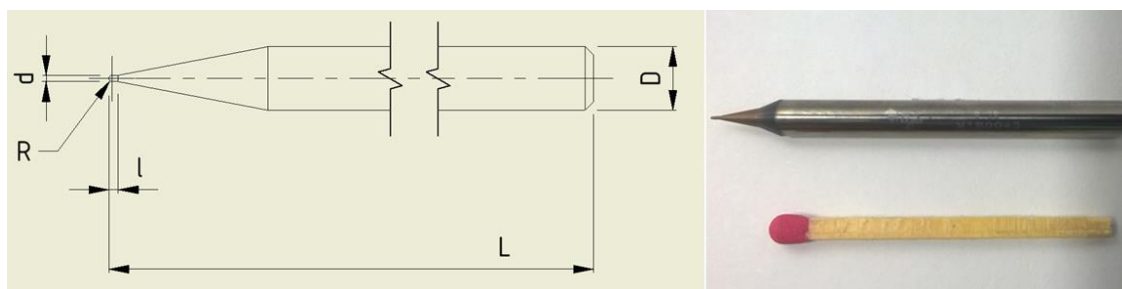


Figura 5: Ferramenta de corte

Código	Dimensões				
	Diâmetro d	Comprimento de corte l	Comprimento total L	Diâmetro da Haste D	Raio R
HA 04 ST600	0,4 mm	0,8 mm	50 mm	4 mm	0,4 mm

Tabela 1: Dimensões da ferramenta de corte utilizada nos experimentos de usinagem

Foi necessário realizar a medição do raio de aresta (R_e) das microfresas para a escolha mais apropriada dos parâmetros como f_z e a_p para a realização dos ensaios de usinagem. As medições do raio de aresta da microfresa foram realizadas utilizando um microscópio confocal modelo Olympus OLS4100, equipamento do Laboratório de Otimização dos Processos de Fabricação (OPF) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo – USP, conforme apresentado na Figura 4, o valor médio apresentado após as medições do raio de aresta foi de 0,003 mm. A profundidade de corte radial (a_e) e axial (a_p) mantiveram-se constantes e iguais a 0,02 mm em todos os ensaios. Como variáveis de saída têm-se a força de usinagem e o acabamento superficial.

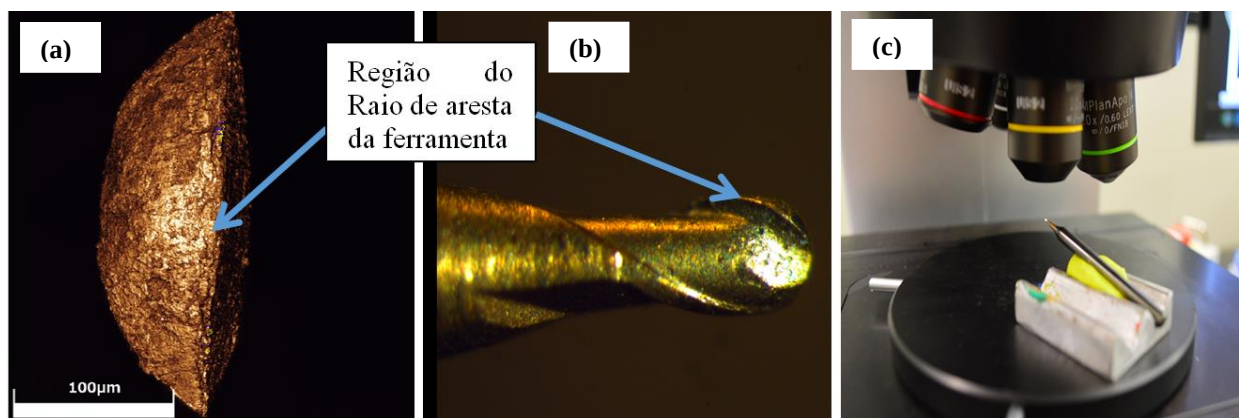


Figura 3. Detalhes da medição do raio de aresta, (a) imagem obtida no microscópio confocal, (b) ponta da microfresa e (c) fixação da ferramenta na base do microscópio.

Os parâmetros utilizados como variáveis de entrada foram, sentido de corte concordante e discordante, e direção de usinagem ascendente e descendente, avanço por dente (f_z) foi mantido constante. O Valor de f_z adotado $f_z = 20\% > R_e$ (0,0036 mm) e velocidade de corte (V_c) de 63 m/min, com base no estudo realizado por Santos (2016), onde os resultados demonstraram que quando utilizado valores de f_z maiores, houve uma considerável redução das forças de usinagem e influência do efeito escala na usinagem.

Como nos experimentos foi adotado um valor de f_z constante (avanço por aresta) no qual há menor influência do efeito escala e, visto que os centros de usinagem têm velocidades de rotação do eixo arvore diferentes, assim essas velocidades de rotação iriam influenciar no avanço por aresta, desta forma optou-se por aumentar a velocidade de avanço do centro de usinagem convencional para o valor de f_z ser constante em todos os experimentos, este parâmetro é dado por:

$$vf = n \times f_z \times z \quad (1)$$

Onde vf é a velocidade de avanço e, n é rotação, z é o número de arestas da ferramenta e f_z é o avanço por aresta.

Para medição de erros geométricos foi utilizado a Máquina de Medir por Coordenadas Mitutoyo Strato-Apex integrada a um sistema CAI (Inspeção Assistida por Computador) onde foi realizada a comparação da geometria CAD com a peça.

A análise da rugosidade foi realizada com o rugosímetro da marca Taylor Hobson, modelo Talysurf Perfilometro o parâmetro de rugosidade utilizado para a avaliação da textura superficial foi R_a . O comprimento de amostragem foi de 1,6 mm. O corpo de prova foi fixado com um ângulo de 45° com relação ao plano horizontal e a avaliação da rugosidade foi realizada no sentido transversal ao sentido da usinagem.

A Figura 4(a) apresenta a medição do erro de forma realizado pela MMC (Máquina de medir por coordenadas), a Figura 4(b) demonstra a avaliação da rugosidade no parâmetro R_a .

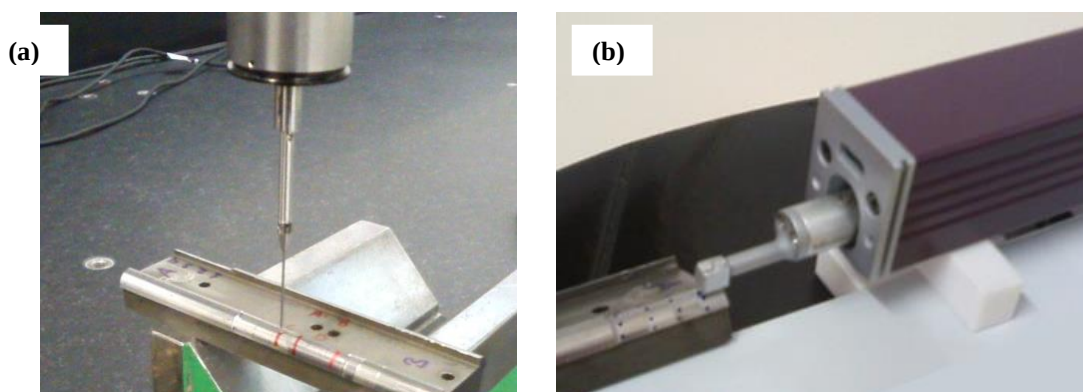


Figura 4. (a) Medição do erro de forma por máquina de medir por coordenada, (b) medição de rugosidade.

A Figura 5 apresenta o detalhamento do procedimento experimental.

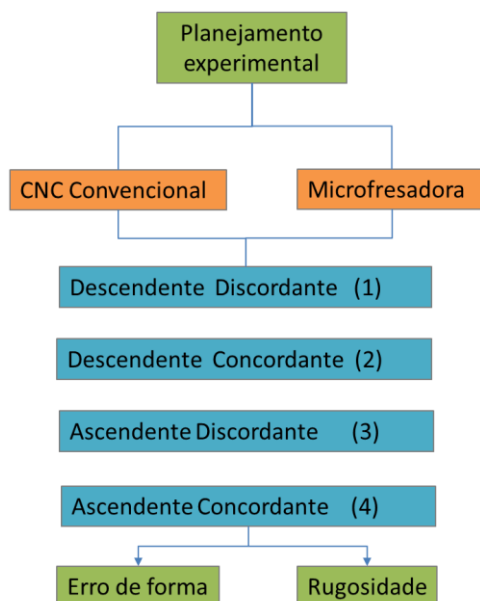


Figura 5. Detalhamento do procedimento experimental.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Estudos do Erro Geométrico

A Figura 6 apresenta os erros geométricos dos corpos de prova gerados pelas diferentes máquinas CNC. Estes valores de erro foram medidos a partir da diferença entre os pontos obtidos pela máquina de medir por coordenada e da geometria CAD. Foram medidos 40 pontos no total de cada usinagem, estes pontos foram especialmente selecionados por estarem mais distantes da geometria original. Na Figura (6) são apresentadas as médias dos erros de forma e o desvio padrão, para cada direção e sentido de corte avaliado. Onde as usinagens 1, 2, 3 e 4 são respectivamente Descendente discordante, Descendente Concordante, Ascendente discordante, Ascendente concordante.

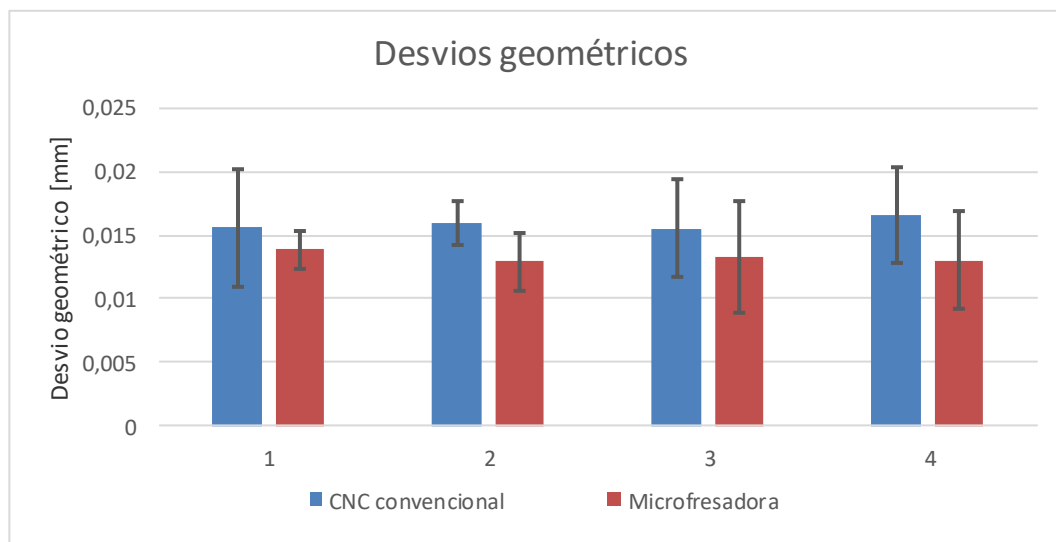


Figura 6. Erro geométrico dos corpos de prova gerado pelas diferentes máquina CNC.

Nota-se que a microfresadora apresentou um valor de erro não esperado mesmo com valores de desvios menores do que a máquina CNC convencional, para a microfresadora é esperado uma precisão em escala manométrica segundo o fabricante, para o CNC convencional o erro está dentro do que a precisão da máquina pode atingir.

Sugere-se que os valores dos erros de forma apresentados pela microfresadora são influenciados pela ferramenta de corte utilizada nos ensaios, pois no microfresamento as relações entre diâmetro e comprimento da ferramenta chegam a uma diferença de 100 vezes, ocasionando a deflexão da ferramenta podendo provocar vibrações.

O comprimento de balanço excessivo característico do microfresamento pode ter levado a valores de erros de formas maiores do que o esperado. Percebe-se o erro de forma não é influenciado entre os casos estudados 1, 2, 3 e 4.

Um fator importante a ser observado é nos demais erros do processo de usinagem que podem afetar no valor de erro geométrico dos centros de usinagem CNC dentre os principais destacam-se: zeramento da peça e da ferramenta e desgaste da ferramenta.

3.2. Análise de rugosidade (R_a)

A Figura 7 apresenta os valores de rugosidade obtidos conforme cada ensaio.

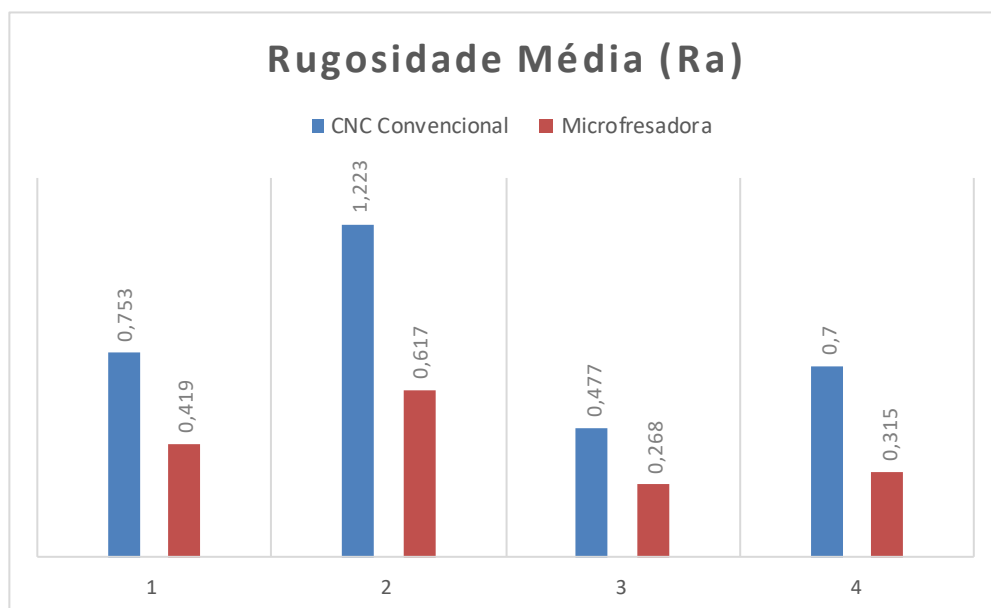


Figura 7. Erro geométrico dos corpos de prova gerado pelas diferentes máquina CNC.

Nota-se em todos os casos estudados que a Microfresadora foi superior, a rugosidade média foi 94,5% mais baixa em comparação com o CNC convencional.

Sobre a direção de corte, em ambas as máquinas, a direção ascendente (3 e 4) proporcionou melhor resultado, com destaque especial para o caso Ascendente discordante (3) que, apresentou ser a melhor alternativa quando buscar uma baixa rugosidade no microfresamento. O pior caso foi para direção Descendente e sentido Concordante (2).

De acordo com Rahman et al (2010) supõe-se ainda que tais desvios na rugosidade apresentados pela máquina CNC convencional, podem ter sido maiores devido ao sistema de fixação que pode apresentar vibrações, deformações mecânicas e térmicas, em alguns casos pode se tornar inviável a utilização de equipamentos convencionais na microusinagem.

4. CONCLUSÕES

Este artigo apresenta um estudo sobre o comportamento de dois centros de usinagem, um equipamento convencional CNC e um centro de usinagem CNC específico para microfresamento, avaliando erros geométricos, rugosidade das peças usinadas. As principais conclusões são apresentadas a seguir.

Percebe-se o erro de forma não é influenciado entre os casos estudados, direção e sentido de corte, apenas que a microfresadora teve, em média, um erro de forma menor que o CNC convencional. Supõe-se erro de forma elevado para as duas máquinas foi provocado pela instabilidade da ferramenta de corte durante a usinagem, devido ao excessivo comprimento de balanço da ferramenta.

Já na análise de rugosidade nota-se uma diferença na qualidade superficial entre os casos estudados, em ambas as máquinas, a direção Ascendente proporcionou melhor resultado, com destaque especial para o caso Ascendente com sentido de corte Discordante que, apresentou ser a melhor alternativa quando buscar uma baixa rugosidade no microfresamento de geometrias complexas.

A Microfresadora foi superior em todos os casos, a rugosidade média foi 94,5% mais baixa em comparação com o CNC convencional.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Faculdade de Tecnologia SENAI Blumenau SC, a FAPESC à aquisição das ferramentas de corte e o material utilizado nos experimentos através do projeto sob termo de outorga número 11.337/2012-9 e a empresa Tecnodrill® pela colaboração com o eixo-arvore de alta rotação.

6. REFERÊNCIAS

- ARAMCHAROEN, A., 2008, et al. Evaluation and selection of hard coatings for micro milling of hardened tool steel. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 48. 1578– 1584.
- BISSACCO, G.; HANSEN, H. N.; DE CHIFFRE, L., 2005, Micromilling of hardened tool steel for mould making applications. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 167, n. 2-3, p. 201-207, Ago.
- BODZIAK, S., 2012, Estudo do microfresamento aplicado na indústria de moldes e matrizes como alternativa à usinagem por eletroerosão. Dissertação (Mestrado), Instituto Superior Tupy, Joinville.
- BODZIAK, S.; Souza, Adriano Fagali; DINIZ, A. E., 2013, Surface integrity of moulds for microcomponents manufactured by micromilling and electro-discharge machining. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. v. 1, p. 1.
- CHAE, J.; PARK, S. S.; FREIHEIT, T., 2006, Investigation of micro-cutting operations. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, New York, v. 46, p. 313-332.
- DORNFELD, D., MIN, S., TAKEUCHI, Y., 2006, Recent Advances in Mechanical MicroMachining. In: *Annals of the CIRP*, v.55, 745-768.
- HOFFMANN, T. C.; SOUZA, A. F.; SANTOS, J. A., 2015, Avaliação de centros de usinagem CNC, convencionais e microfresamento, e o comportamento de trajetórias de ferramenta geradas por sistemas CAM para a fabricação de formas complexas. *Ferramental*, v. 60, p. 10-14.
- I. S.Kang, J.-S.Kim, Y.-W.Seo, 2011, Investigation of cutting force behavior considering the effect of cutting edge radius in the micro-scale milling of AISI 1045 steel, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B: J. Eng. Manuf.* 225 163–171.
- KISWANTO, G.; ZARIATIN, D.L., 2014, The effect of spindle speed, feed-rate and machining time to the surface roughness and burr formation of Aluminum Alloy 1100 in micro-milling operation. *Journal of Manufacturing Processes* 16 435–450
- Baldo, D., 2013, “Estudo Do Microfresamento Da Liga De Titânio Ti–6Al–4V Utilizando Análise De Sinais De Força E Emissão Acústica”, Universidade Federal de São João del-Rei, Brazil.
- Oliveira F B, Rodrigues A R, Coelho R T, de Souza A F. Size effect and minimum chip thickness in micromilling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 89 (2015) 39-54.
- OLIVEIRA, F. B.; RODRIGUES, A. R.; COELHO, R. T.; SOUZA, A.; F. 2015; Size effect and minimum chip thickness in Micromilling. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 89, 39–54
- SANTOS, J., 2016, Estudo do efeito escala no microfresamento de formas complexas do aço AISI P20. Dissertação (Mestrado) – Centro Universitário Tupy, Joinville.
- SIMONEAU, A.; NG E.; ELBESTAWI, M.A., 2006, Surface Defects During Microcutting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. v. 46, n. 12-13, p. 1378-1387.

7. DIREITOS AUTORAIS

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