

MONITORAMENTO DO PROCESSO: ANÁLISE DA RESOLUÇÃO DA VARIÁVEL MONITORADA NO CNC ABERTO

Erik Gustavo Del Conte (UNIMEP)

eigconte@unimep.br

Maria Célia de Oliveira Papa (UNIMEP)

mrcpapa@unimep.br

Carlos Eduardo Ribeiro Rodrigues (UNIMEP)

cerodrigue@unimep.br

Klaus Schützer (UNIMEP)

schuetzer@unimep.br

Alvaro José Abackerli (IPT)

abakerli@unimep.br



A manufatura de peças utilizando usinagem de altíssima velocidade, denominada High Speed Machining (HSM) possibilita obter superfícies com acabamentos de alta qualidade, especialmente na usinagem de moldes e matrizes, além de permitir processos de usinagem com alta taxa de remoção de material na usinagem de ligas não-ferrosas, aplicadas na indústria aeronáutica. Dentre as tecnologias que possibilitam tais vantagens este estudo avalia o monitoramento do processo, em especial o monitoramento de dados do controlador numérico da máquina-ferramenta. O conceito do controlador de arquitetura aberta, presente nas modernas máquinas HSM proporciona a implementação de sistemas de monitoramento de dados, porém, pouco se conhece sobre a qualidade dos dados obtidos. Uma das formas de avaliar a qualidade destes dados é analisar a resolução da variável monitorada, para diferentes valores de velocidade de avanço. Assim, o objetivo deste estudo é analisar a resolução obtida no monitoramento de dados de um CNC de arquitetura aberta, considerando diferentes valores de velocidade de avanço. Os resultados mostraram que os valores de resolução da variável estão dentro dos limites de controle, indicando que a repetitividade pode ser considerada aceitável para o monitoramento de dados do CNC aberto.

Palavras-chaves: Monitoramento do processo, usinagem, CNC aberto

1. Introdução

Dentre as tecnologias mais usadas pelas indústrias de moldes e matrizes está a usinagem com altíssima velocidade, denominada *High-Speed Machining (HSM)* aplicada especialmente para a usinagem de peças cujas superfícies são denominadas livres, complexas, ou esculpidas. De acordo Jiang *et al.* (2007), ao contrário das superfícies convencionais, as superfícies livres não possuem eixos de rotação. Aplicações destas superfícies são encontradas em diversas áreas, como por exemplo, na indústria aeronáutica para usinagem de ligas não-ferrosas, conforme verificado em Fang *et al.* (2008); nas aplicações na indústria óptica; Fu *et al.* (2008) estuda a diferenciação de superfícies livres similares, especialmente usadas na indústria de produtos domésticos; Cheung *et al.* (2007) avalia micro superfícies com aplicações na indústria de telecomunicações; Jiang *et al.* (2006) avalia o projeto e fabricação de superfícies livres na indústria automotiva; entre outros.

Existem diversas vantagens na manufatura de peças utilizando *HSM*, uma delas é a possibilidade de obter superfícies com acabamentos de alta qualidade na usinagem de moldes e matrizes. Outra vantagem é a alta taxa de remoção de material na usinagem de ligas não-ferrosas aplicadas na indústria aeronáutica. Tais vantagens podem resultar na otimização do processo de usinagem por meio da redução do tempo e do custo do processo, o que contribui para o aumento da competitividade na manufatura.

Tais características são reafirmadas por Lartigue *et al.* (2004), Albertine *et al.* (2007), Tzeng e Chen (2005) e Dagiloke *et al.* (1995) que reafirmam a otimização do processo de usinagem pela redução do tempo de usinagem e pelo aumento de sua qualidade.

Dentre as tecnologias para a otimização da manufatura em altíssima velocidade, pode-se citar o monitoramento do processo e em especial o monitoramento de dados do controlador da máquina-ferramenta. Porém, segundo Wang *et al.* (2004) e Haber e Alique (2007), existe uma lacuna entre as tecnologias de integração e a capacidade dos algoritmos de programação para capturar informações para a otimização do processo por meio de controle e monitoramento. O monitoramento de um processo é caracterizado pelas seguintes etapas: aquisição de dados, por meio de sensores, análise de dados, por meio de métodos estatísticos e tomada de decisão, para manter o processo em condições pré-estabelecidas e otimizadas para a usinagem. Quando o monitoramento é feito simultaneamente à execução do processo ele é chamado monitoramento *online*.

Segundo Haber *et al.* (2003), além das melhorias e modernizações já apresentadas no mercado, os fabricantes de máquinas ferramenta tem incluído nos projetos de suas máquinas funções de proteção de motores, *drivers* e ferramentas de corte que possibilitam, além do monitoramento, a execução de funções voltadas ao controle das forças de corte, vibrações e velocidades, que também facilitam a otimização do processo com a conseqüente redução de custos de fabricação.

Para Cus *et al.* (2006), outra questão que deve ser considerada pelas indústrias são os valores dos parâmetros de programação das máquinas ferramenta. Tradicionalmente, estes parâmetros são baseados na experiência do operador ou em manuais técnicos, que geralmente resulta na utilização de parâmetros conservadores que priorizam a prevenção de falhas no processo. A utilização do monitoramento *online* possibilita ajustar os parâmetros de programação em função do comportamento da máquina durante o processo de usinagem, que muitas vezes possibilita a sua otimização considerando outros aspectos do processo, além da prevenção de falhas (monitoramento do desgaste da ferramenta, por exemplo).

Para que isso seja possível, dois níveis de arquitetura aberta são considerados pelos fabricantes de máquinas ferramenta e de *CNCs (Computer Numerical Control)* e classificados

da seguinte forma: nível de abertura da comunicação homem-máquina (*MMC - Man Machine Communication*) e nível de abertura do *kernel*, dado pelo núcleo de processamento do sistema operacional do comando numérico (*NCK - Numerical Control Kernel*) (HABER *et al.*, 2001). O conceito do controlador de arquitetura aberta, presente nas modernas máquinas *HSM* proporciona a implementação de sistemas de monitoramento de dados, porém, pouco se conhece sobre a qualidade dos dados obtidos. Uma das formas de avaliar a qualidade destes dados é analisar a resolução da variável monitorada, para diferentes valores de velocidade de avanço.

Assim, objetivo deste estudo é analisar a resolução obtida no monitoramento de dados de um CNC de arquitetura aberta, considerando diferentes valores de velocidade de avanço.

Para responder ao objetivo proposto este artigo está organizado em cinco seções. A seção 2 apresenta e discute os principais conceitos sobre monitoramento de processo de usinagem *HSM* e controlador de arquitetura aberta. A seção 3 descreve os materiais e métodos usados e a seção 4 discute os experimentos realizados e apresenta os resultados, seguido pelas considerações finais apresentadas na seção 5.

2. Monitoramento do Processo de Usinagem *HSM*

A trajetória da ferramenta de corte é determinada por métodos de interpolação. Estes métodos possibilitam a usinagem de superfícies livres pela movimentação simultânea dos eixos da máquina. Particularmente na usinagem *HSM*, o método de interpolação linear influencia no comportamento dinâmico da máquina, já que neste caso existem descontinuidades nas junções dos segmentos de reta que formam a trajetória, diminuindo de forma significativa a velocidade de avanço. Segundo Lartigue *et al.* (2004), para que esta diminuição não ocorra utiliza-se a interpolação polinomial, que assegura a continuidade da trajetória, evita limitações de tempo de processamento e gera resultados como maior velocidade média de avanço.

Vários autores discutem as influências das diferentes metodologias de interpolação na usinagem *HSM* quando diferentes métodos de interpolação são aplicados. Dentre eles, este estudo destaca os trabalhos desenvolvidos por Lartigue *et al.* (2004), Altintas e Erkorkmaz (2003), Monreal e Rodrigues (2003), Meo (2007), Cheng *et al.* (2002), Lei *et al.* (2007). Os resultados destes estudos mostram que com o monitoramento da velocidade de avanço, da aceleração dos eixos e do tempo de usinagem pode-se identificar os parâmetros de programação que resultam na otimização do processo.

A Figura 1 ilustra o *loop* de controle de um processo de usinagem. Nele é ilustrada a retroalimentação de forma manual nas etapas no processo de fabricação e apesar de atualmente as tecnologias de automação e controle estarem disponíveis para utilização o *loop* apresentado na Figura 1 e desenvolvido há aproximadamente 20 anos atrás é amplamente aplicado no ambiente industrial (Kumar *et al.*, 2007).

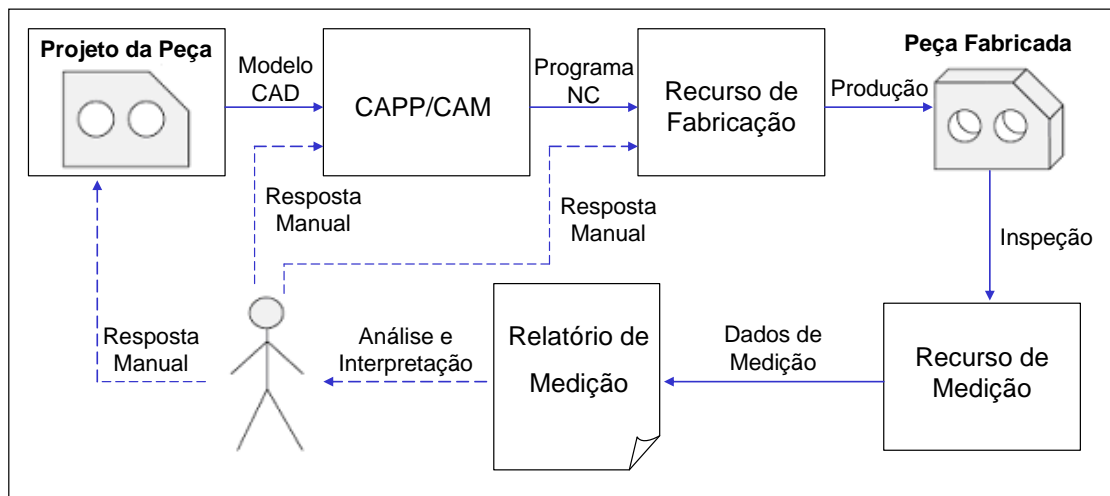


Figura 1: Estrutura atual de controle na manufatura CNC. Fonte: Kumar et al. (2007)

Observa-se também na Figura 1 que a correção dos parâmetros de programação *Computer Aided Manufacturing - CAM* é feita de forma manual, e a fonte de informação que o usuário tem acesso para analisar o desempenho da programação *NC* é o relatório de medição geométrica. Porém, este tipo de análise não permite identificar a influência dos métodos de interpolação na velocidade de avanço e no tempo de usinagem. Para que isso seja possível é necessário desenvolver um sistema que execute o monitoramento dessas variáveis, trate os dados e mostre os resultados ao usuário com uma interface detalhada, porém de fácil compreensão.

De acordo com Kumar *et al.* (2007), mesmo para o caso de *CNC* baseado em computadores, falta uma estrutura de comunicação entre a máquina ferramenta e os sistemas computacionais de apoio à manufatura, principalmente com os sistemas *CAM*, que têm relação direta com o desempenho do processo de usinagem.

Nota-se assim a ausência de uma interface entre os sistemas *CAD/CAM/CNC* e o usuário do processo de usinagem *HSM*, porém o controlador de arquitetura aberta, ou simplesmente *CNC* aberto, propõe promover o desenvolvimento e implementação de sistemas que atendam as necessidades do usuário.

O conceito do controlador de arquitetura aberta recebeu um maior destaque na década de 90, época esta em que a flexibilidade exigida pelos sistemas de manufatura e a necessidade de implementação de funções customizadas pelos usuários requeriam uma interface neutra de acesso aos dados.

O Instituto dos Engenheiros Elétricos e Eletrônicos - IEEE (1998) define um sistema de arquitetura aberta como um sistema que possui características que habilitam que as aplicações desenvolvidas sejam executadas em várias plataformas, de diferentes fabricantes, interoperáveis com outros sistemas e com uma interação consistente com o usuário.

Considerando que o controlador de arquitetura aberta permite o monitoramento de dados da máquina aplicada no processo *HSM*, a resolução dos dados monitorados é um fator importante, pois essa influência na qualidade dos dados amostrados. Desta forma, e para atender ao objetivo deste estudo, a próxima seção descreve os materiais e o método utilizado para desenvolver este trabalho.

3. Materiais e Métodos

Para atender aos objetivos deste estudo e analisar o comportamento da resolução obtida no monitoramento *online*, foram considerados nos ensaios realizados com os seguintes valores de velocidade de avanço: 600, 1.000, 6.000 e 12.000 mm/min.

O experimento foi executado em um centro de usinagem de três eixos equipado com *CNC* Siemens 810D. Os dados de posição e velocidade do eixo X foram simultaneamente coletados através de um *trigger* que congela os dados do sistema de controle no início da movimentação e os coloca num *buffer* indexado para posterior recuperação. As variáveis do *CNC* que foram monitoradas são \$VA_IM1[X1] e \$VA_VACTM [X1] que correspondem respectivamente à posição e à velocidade do eixo X. Apesar do centro de usinagem possuir três eixos, foi escolhido somente o eixo X para monitoramento, pois se assume que a análise para o eixo X pode ser estendida para os demais eixos, devido à taxa de amostragem ser a mesma.

Além disso, para a coleta dos dados foi elaborado o seguinte programa *NC*, de acordo com Del Conte e Schützer (2007):

```
G54
G1 X0 Y0 F1000
F (Programado com 4 níveis diferentes 600, 1000, 6000, 12000 mm/min)
$AC_MARKER[1]=0
$AC_MARKER[2]=1
ID=1 DO $R[$AC_MARKER[1]]=$VA_IM1[X1] $R[$AC_MARKER[2]]=
    $VA_VACTM[X1] $AC_MARKER[1]=$AC_MARKER[1]+2
    $AC_MARKER[2]= $AC_MARKER[2]+2
X80
M30
```

O programa *NC* executa um movimento linear no eixo X entre as coordenadas 0 e 80 mm usando o recurso de programação chamado de ação síncrona. Isso é feito no programa pela linha de programação ID=1. Os valores de posição e velocidade do eixo X são assim armazenados ciclicamente no *buffer* do *CNC* a cada 10 ms e transmitidos para um arquivo com o sistema de monitoramento desenvolvido por Del Conte e Schützer (2007).

4. Resultados e Discussões

Inicialmente gerou-se um gráfico para avaliar a variação da posição em relação à velocidade, para cada uma das velocidades de avanço consideradas neste estudo, como pode ser visto na Figura 2.

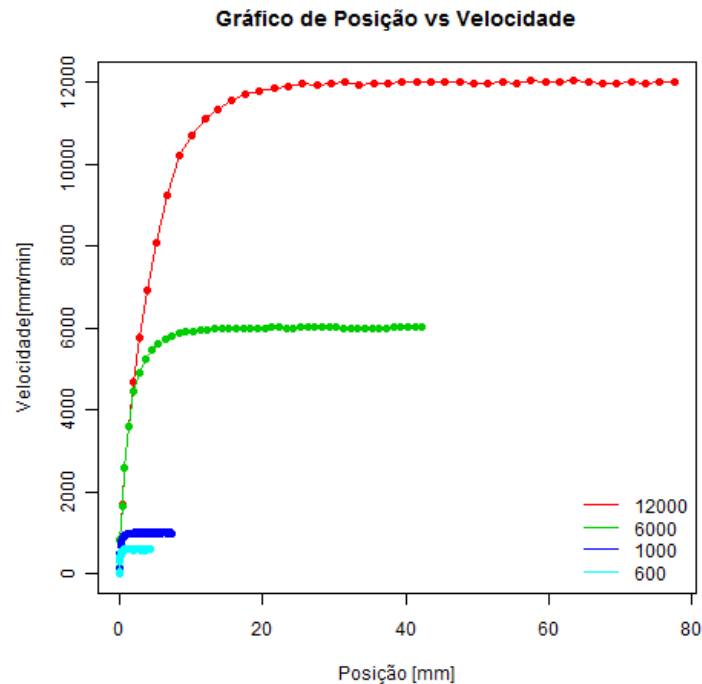


Figura 2: Gráfico da Posição *versus* a Velocidade do eixo X, para cada velocidade de avanço. Na Figura 2 é apresentado o comportamento da variável posição para os diferentes valores de velocidade de avanço. Devido à aquisição de dados ser executada ciclicamente numa taxa constante de 10 ms e o tamanho do *buffer* do CNC aberto ser limitado, observa-se que com o aumento da velocidade a distância entre pontos medidos aumenta, caracterizando a influência da velocidade de avanço na resolução da variável monitorada. Para ilustrar melhor este comportamento, a Figura 3 apresenta os resultados verificados apenas para os primeiros dados coletados para a velocidade de avanço.

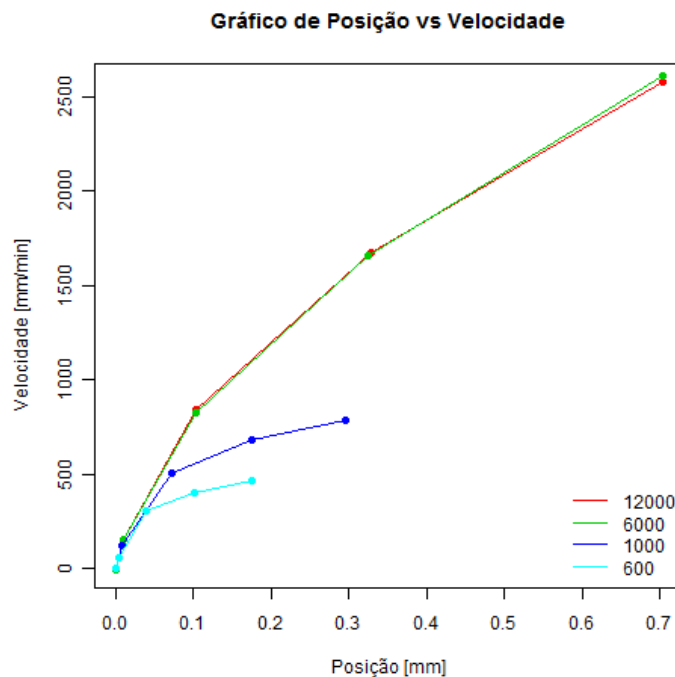


Figura 3: Gráfico da Velocidade *versus* a Posição, para cada velocidade de avanço avaliada posição inicial.

Observa-se na Figura 3, para as posições iniciais a influência da variação da velocidade ou aceleração no distanciamento entre pontos medidos, caracterizando a perda de resolução dos dados.. Finalmente, a Figura 4 mostra a resolução em função da velocidade.

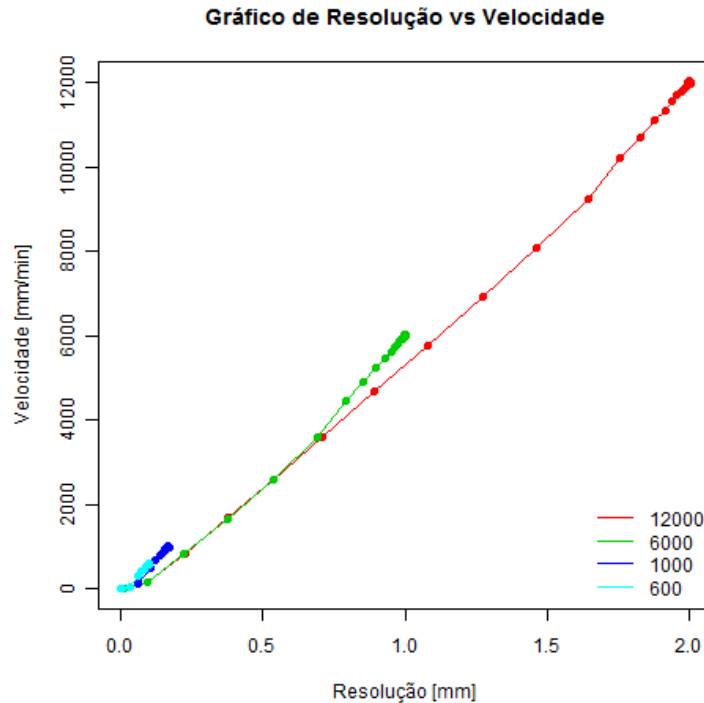


Figura 4: Gráfico da Resolução *versus* a velocidade, para cada velocidade de avanço.

A resolução apresentada na Figura 4 foi obtida pela diferença entre a posição medida menos a posição medida anterior. Ao resultado dessa diferença foi relacionada à respectiva velocidade de avanço como ilustra a Figura 2.

Observa-se no gráfico que a menor resolução acontece para a velocidade de 12,000 mm/min, sendo de 2 mm. Considerando que esta é a menor resolução, pode-se considerá-la como sendo o pior caso e como tal, assumido conforme a definição em INMETRO (2000) como *a menor diferença entre indicações que pode ser significativamente percebida*, para a velocidade de 12.000 mm/min.

Com a derivada da velocidade em relação à posição (ver Figuras 2 e 3) é obtida a taxa de amostragem dos dados que neste estudo foi de 10 ms. Assim pode-se obter teoricamente a influência da velocidade de avanço na resolução da variável. Porém foi constatado nesse experimento que a resolução possui uma variação, conforme mostra o gráfico de controle da Figura 5 com todos os valores da resolução para as respectivas velocidades.

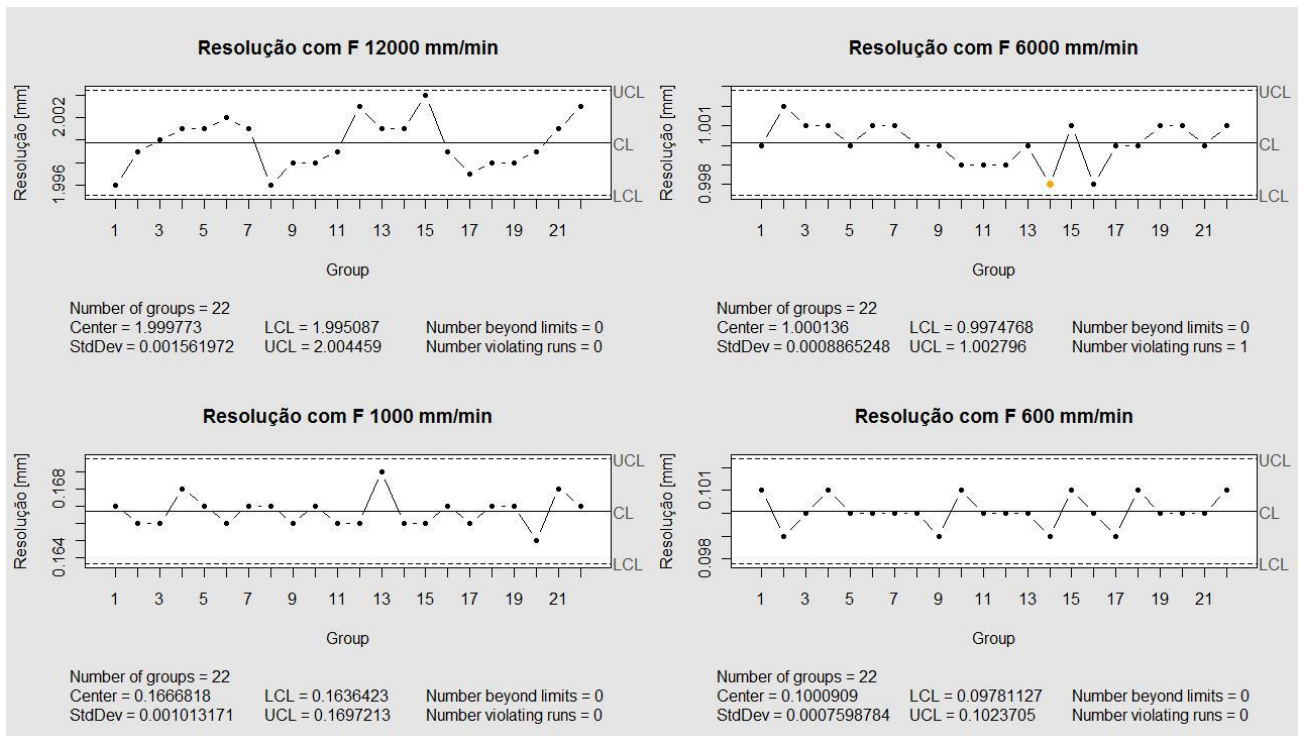


Figura 5: Gráfico de controle da resolução para cada valor de velocidade

Dado que a avaliação foi feita considerando as velocidades de 600 mm/min, 1.000 mm/min, 6.000 mm/min e 12.000 mm/min, os resultados mostraram que, apesar das velocidades maiores apresentarem maior variabilidade, os valores estão dentro dos limites de controle. Tais limites são dados pelas médias e desvios padrão das resoluções. Assim, verifica-se que entre os valores observados para a resolução ocorre apenas a variabilidade inerente ao processo de monitoramento de dados de um CNC de arquitetura aberta, indicando a inexistência de alguma influência que poderia resultar em valores de resolução discrepantes. Deste resultado observa-se, do ponto de vista prático, que o sistema de monitoramento de dados aqui avaliado possui repetitividade aceitável, com variação máxima em torno de 0,009 mm (valor obtido pela diferença entre o limite superior (2,004) e limite inferior (1,995) para a velocidade com maior variabilidade, que foi a de 12000 mm/min, ver Figura 5 resolução com F 12000 mm/min)

5. Considerações Finais

Neste trabalho foi proposto o objetivo de avaliar a resolução obtida no monitoramento de dados do CNC aberto, considerando diferentes valores de velocidade de avanço. Dos gráficos gerados para análise dos dados, observou-se que o aumento da velocidade de avanço influencia a resolução da variável monitorada, conforme pode ser visto nas Figuras 2 e 3. Isso ocorre, pois a velocidade de deslocamento do eixo é maior que a taxa de amostragem com a estratégia de aquisição de dados do CNC aberto em questão, conforme já observado em outros estudos.

O resultado mais importante deste estudo se refere aos observados no gráfico de controle, que mostrou que o sistema de aquisição de dados utilizado proporciona valores de resolução da variável dentro dos limites de controle. Nota-se também nos resultados numéricos apresentados no gráfico, que os desvios padrão da posição para cada uma das velocidades são baixos em relação à exatidão de trabalho comumente obtida num centro de usinagem convencional, indicando a aptidão do sistema de medição em fornecer indicações muito

próximas, caracterizando uma repetitividade aceitável para o monitoramento de dados do CNC aberto.

Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo suporte financeiro ao projeto HoliMan (Holistic optimisation of sculptured surfaces manufacturing) no âmbito do programa BRAGECRIM (Brazilian German Collaborative Research Initiative in Manufacturing Technology).

Referências Bibliográficas

- ALBERTÍ, M., CIURANDA J., RODRIGUEZ, C. A.** *International Journal of Machine Tools & Manufacture, Experimental analysis of dimensional error vs. cycle time in high-speed milling of aluminum alloy*, Vol. 47, n. 2, p. 236 – 246, 2007.
- ALTINTAS, Y., ERKORKMAZ, K.,** *Annals of CIRP, Feedrate Optimization for Spline Interpolation in High Speed Machine Tools*, Vol. 52, n 1, 2003.
- CHEUNG, C. F. et al.** *An integrate form characterization method for measuring ultra-precision freeform surface*, Machine Tools & Manufacturing, Vol. 47, p. 81-91, 2007.
- CHENG, M., TSAI, M. KUO, J.** *International Journal of Machine Tools & Manufacture, Real-time NURBS command generators for CNC servo controllers*, Vol. 42, n. 7, 2002.
- CUS, F.; MILFELNER, M.; BALIC, J.,** *Journal of Materials Processing Technology, Maribor, An intelligent system for monitoring and optimization of ball-end milling process.*, Vol. 175, n. 1 – 3, p. 90 – 97, 2006.
- DAGILOKE, I. F. et al.** *Journal of Materials Processing Technology, High-speed machining: an approach to process analysis*, Vol. 54, n 1, p. xxx, 1995.
- DEL CONTE, E. G., SCHÜTZER, K.** *Data Acquisition Strategy for Open CNC Monitoring in HSM Process. In: COBEM 2007 - 19th International Congress of Mechanical Engineering, 2007, Brasília, DF, 2007.*
- FANG, FT. Z.; ZHANG X. O.; HU, X. T.** *Cylindrical coordinate machining of optical freeform surface*, *Optics Express*, Vol 16, p. -17, 2008.
- FU, J.; JOSHI, S. B.; SIMPSON, T.** *Shape differentiation of freeforms surfaces using a symmetry measure based on an integral for Gaussian curvature*, Vol. 40, p. 311-323, 2008.
- HABER, R. E. et al.,** *Computers in Industry, Embedded fuzzy-control system for machining processes results of a case study*, Vol. 50, n. 3, p. 353-366, 2003.
- HABER, R. E., ALIQUÉ, J. R.,** *IEEE, Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, Fuzzy Logic-Based Torque Control System for Milling Process Optimization.* Vol. 37, n. 5, 2007.
- HABER, R. E., CANTILHO, K., JIMÉNEZ, J. E.,** *Sensors and Actuators, Networked sensing for high-speed machining processes based on CORBA*, Vol. 119, p. 418–426, 2005.
- IEEE** *IEEE/NEMI PR 1533-1998, IEEE/NEMI Low-Cost Open Architecture Controller Specification, Standards products catalog*, 1998.
- INMETRO.** *Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia.* 2. ed. Brasília, 2000.
- JIANG, J. B. et al.** *Designs and fabrication of freeform reflectors for automotive headlamp*, 2nd International Conference on Power Electronic Systems and applications, p. 220-224, 2006
- KUMAR, S., et al.** *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Process control in CNC manufacturing for discrete components: A STEP-NC compliant framework*, Vol. 23, n 6, 2007.
- LARTIGUE, C. et al.** *CIRP Annals, High-Performance NC for HSM by means of Polynomial Trajectories.*, Vol. 53, n. 01 p, 2004.

LEI, W. T., et al. *International Journal of Machine Tools & Manufacture, Fast real-time NURBS path interpolation for CNC machine tools*, Vol. 47, n 10, 2007.

MEO, F. *Innovative Production Machines and Systems Algorithms for the optimized generation of trajectories through Splines, and their integration into open architecture control systems*, In: *IPROMS*, 2007.

MONREAL, M., RODRÍGUEZ, C. *Computer-Aided Design, Influence of Tool Path Strategy on the Cycle Time of High-speed Milling*, Vol. 35, n. 4, 2003.

PRITSCHOW, G., et al. *Annals of the CIRP, Open Controller Architecture - Past, Present and Future*. Vol. 50 (2), p. 1-8, 2001.

TZENG, Y., CHEN, F. *JSME International Journal. Ser C. Mechanical Systems, Mach Elem Manuf., Optimization of the High-Speed CNC Milling Process Using Two-Phase Parameter Design Strategy by the Taguchi Methods.*, Vol. 48., n 4, p. xxx, 2005.

WANG, L., et al. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Remote real-time CNC machining for web-based manufacturing*, Vol. 20, n. 6, p. 563–571., 2004.