

ANALISE E COMPARAÇÃO DO MONITORAMENTO DA RUGOSIDADE (R_a , R_t) POR SISTEMA DE SOM

PAULO HENRIQUE DA SILVA CAMPOS (UNIFEI)

paulohcampos@bol.com.br

João Roberto Ferreira (UNIFEI)

jorofe@unifei.edu.br

Pedro Paulo Balestrassi (UNIFEI)

ppbalestrassi@gmail.com



Este artigo descreve um sistema de monitoramento baseado em som para analisar e comparar com os valores das rugosidades R_a e R_t obtidos no torneamento do aço ABNT H13 temperado utilizando ferramenta CBN. Os testes realizados mostram a capacidade do sistema para identificar as variações apresentadas no processo quando utilizado diferentes parâmetros de usinagem. Este estudo também analisa a capacidade do sistema para distinguir variações no desgaste da ferramenta em função dos parâmetros de usinagem utilizados. É utilizada a metodologia de superfície de resposta (MSR) na modelagem de duas características da rugosidade da superfície. Os resultados demonstram a eficácia do sistema de monitoramento para detectar falhas no processo e na comparação dos valores de rugosidades.

Palavras-chave: Torneamento Duro, Metodologia de Superfície de Resposta, Rugosidade da Peça, Processo de Monitoramento de Som

1. Introdução

O torneamento de materiais duros vem sendo cada vez mais utilizado ao longo dos últimos anos, devido ao crescente aumento da demanda de produção e à necessidade de redução dos custos de fabricação, oriundos da exigência cada vez maior das novas tecnologias empregadas nos processos industriais. Convencionou-se chamar de torneamento duro a remoção de cavacos em materiais com dureza na faixa 45-65 HRC. Há poucos anos, materiais que necessitavam ser usinados em sua forma endurecida, o eram apenas pelo processo de retificação (DAVIM, 2011; CAMPOS et al. 2014).

Devido ao desenvolvimento de materiais para ferramentas de elevada dureza e resistência ao desgaste em altas temperaturas, aliados ao surgimento de máquinas ferramentas de maiores rigidez e precisão dimensional em altas rotações, é possível a usinagem destes materiais pelo processo de torneamento. O estudo de alguns trabalhos acena com a possibilidade de obtenção de peças com qualidade semelhante às obtidas na retificação fina, utilizando-se, para isto, tornos de alta precisão, parâmetros otimizados de corte e geometrias especiais de ferramentas (DINIZ et al. 2014).

Com o aprimoramento dos materiais de ferramentas dito “avançados” como o CBN e a cerâmica, concomitantemente com o avanço na manufatura de máquinas ferramentas mais

rígidas, computadorizadas e com tolerância extremamente precisa, a operação de torneamento de aços endurecidos vem se tornando comum. Com a inovação das ferramentas de geometrias alisadoras (*wiper*), tornou-se possível atingir um acabamento de alta qualidade em operações de torneamento quando comparadas com ferramentas convencionais. Para alguns casos, o acabamento também pode se manter para avanços maiores do que os comuns, conduzindo a um aumento da produtividade (SANDVIK, 2010).

No estudo da vida de ferramentas e da rugosidade média das superfícies usinadas pelo processo de torneamento, há vários fatores de influência, como, por exemplo, a velocidade de corte, o avanço, a profundidade de usinagem e a geometria da ferramenta de corte. Na análise convencional da influência destes fatores num processo de usinagem, geralmente é estudada a influência de cada um deles isoladamente, o que demanda um grande número de ensaios, elevado consumo de material e ferramentas, além da necessidade de utilização de muitas horas-máquina, o que em geral, torna os custos com a experimentação proibitivos (BOUACHA et al. 2010).

O atrito entre ferramenta / peça gera um sinal de som contínuo. E este sinal do som oferece informações valiosas sobre o processo de corte. Com a ampliação do uso de sistemas de fabrico flexíveis, agora é considerada crucial para ter uma função de monitoramento que pode detectar ocorrências anormais dessas operações Xiaoli (2002). Usando pistas fornecidas apenas por esses sons, o operador pode identificar a operação, tais como movimentos de mesa, trocas de ferramentas e usinagem com várias ferramentas de corte. Ele também pode distinguir uma mudança no som operacional induzida por uma falha da máquina ou a ocorrência de condições de usinagem incomuns. Esses recursos mostram que o som operacional contém uma grande quantidade de informações sobre a operação que está sendo realizada Takata et al. (1986). Uma razão para esta grande quantidade de informação é os métodos atuais que são dedicados aos problemas específicos e capazes de detectar apenas um número limitado de ocorrências, embora em sistemas de fabrico possa ocorrer uma grande variedade de problemas Siddhpura (2013).

Para problemas críticos ou aqueles que ocorrem com frequência, há uma necessidade de se adotar, para a detecção de quebra da ferramenta, um método de acompanhamento específico, como o monitoramento de emissão acústica. Uma questão fundamental para um controle de usinagem autónoma e automatizada é um sistema de controlo fiável e robusto. Presente em quase todas as operações de corte são vibrações, que são os principais obstáculos para alcançar a produtividade desejada, resultando em mau acabamento da superfície, ruído

elevado e desgaste da ferramenta acelerado. Este último, por sua vez reduz a confiabilidade e a segurança da operação de usinagem Quintana (2011). Muitos investigadores propuseram várias técnicas para detectar e prever uma vibração quando o objectivo é prevenir a ocorrência no processo de corte. Ao prevenir tais ocorrências, é capaz de obter um produto com melhor acabamento superficial, maior produtividade e vida útil da ferramenta. O principal objetivo do controle de ruído industrial é proteger contra vibração, especialmente e falhas em materiais Iskra (2012). Portanto, um sistema de processo de monitoramento é necessário para identificar as condições de corte reais através de sensores no processo. Mecânicos experientes são capazes de detectar uma mudança nas condições de corte ou estado da ferramenta a partir do som audível do processo Dimla (2002). Azouzi e Guillot (1997) aplicaram matrizes ortogonais de projeto de Taguchi para testar diferentes combinações de recursos de sensor para a rugosidade da superfície. Kurada e Bradley (1997) estudaram o uso da força de corte, vibração e sensores de EA de forma independente, e treinou diferentes modelos de Redes Neurais para diagnosticar o desgaste da ferramenta com características no domínio do tempo e frequência.

O elemento fundamental no processo de um sistema de monitoramento de sucesso é a escolha certa de sensores. Uma grande variedade de sensores tem sido utilizada para monitorizar processos de usinagem. Especialistas do dizem que nos próximos anos um grande impacto no processo de fabricação será a integração de sensores para o monitoramento e controle do processo Zhou (1995). Vários métodos foram utilizados para quantificar os efeitos dos parâmetros de usinagem, ou seja, velocidade de corte, avanço de corte, a profundidade de corte, e as variáveis do processo (vibrações, o desgaste da ferramenta e as temperaturas de corte) Abellan (2010). Este artigo descreve um sistema de monitoramento baseado em som, utilizando o Audacity software, capaz de comparar os valores de rugosidades medidos com os sinais emitidos pela frequência do aparelho.

2. Sistema de Som

Máquinas emitem sons como eles funcionam. Um operador humano ao lado da máquina está sempre ouvindo o som operacional. Usando pistas fornecidas apenas por estes sons, ele é capaz de identificar a operação, tais como movimentos de mesa, trocas de ferramentas e usinagem com várias ferramentas de corte. Ele também pode distinguir a mudança no som operacional induzida por falhas da máquina ou a ocorrência de condições de

usinagem anormais Takata et al. (1986). Isso mostra que o som operacional contém uma grande quantidade de informações sobre a operação que está sendo realizada, que o operador pode extrair e reconhecer. Se o sistema emite um som inesperado ou desconhecido, o monitoramento do sistema identifica que uma condição anormal ocorreu. À medida que a voz humana pode ser identificada por técnicas de reconhecimento de voz, pode supor-se que essas técnicas podem também ser aplicadas para o reconhecimento de sons operacionais.

O sistema de reconhecimento de som monitora o som captado por um microfone situado perto da área de usinagem. Ele executa o reconhecimento durante um curto período de tempo e realiza a monitorização em tempo real. Experiências de reconhecimento de sons operacionais foram realizadas com uma usinagem para avaliar o desempenho do sistema. O sistema registrado e reconhecido por 15 sons operacionais. Estes sons operacionais incluíram os movimentos da máquina em si, como a sua velocidade de corte, velocidade de avanço, profundidade de corte, rotação do eixo, e troca de ferramenta. Em seguida, com o resto dos parâmetros inalterados, os parâmetros de velocidade de corte, velocidade de avanço e a profundidade de corte foram avaliadas uma a uma. Para observar se o sistema poderia detectar o som de uma ferramenta muito desgastada, foram realizados vários cortes, até o desgaste máximo da ferramenta.

Tal como no sistema de emissão acústica para eliminar o ruído resultante de cablagem inadequada, foi substituído com o conector do bloco, a interligação por cabo entre o computador e um microfone blindado cabos coaxiais feitas exclusivamente para este fim. Para captar os sinais, um computador foi usado que tinha um Pentium IV 3.4 GHz com 2 GB de RAM e 300 GB de memória física. O computador foi equipado com uma placa de aquisição de dados, National Instruments modelo PCI- MIO -16E -1, e com o Audacity software de captura.

3. Procedimento Experimental

3.1 Material da peça, ferramentas e Instrumentos de Medição

O material da peça utilizada neste estudo foi ABNT H13 aço ferramenta para trabalho a quente, aço usado em ferramentas de alta demanda. Aço ABNT H13 endurecido possui alta dureza, resistência, alta resistência ao choque térmico, fadiga térmica e amolecimento

térmico. Muitos fabricantes usam para trabalho a quente, como aqueles para a fundição, extrusão, forjamento a quente e moldes de plástico Yan (2007).

Devido à condição de corte agressivo e as suas propriedades mecânicas, aço endurecido H13 é reconhecido como uma espécie de material difícil de corte. O processo de corte do aço H13 temperado tem sido um importante tema de muitas publicações Xiong (2013). As barras cilíndricas utilizados nesta experiência tem um diâmetro de 50 mm e um comprimento de 100 mm. Para obter os valores de dureza desejados de 54 HRC, o material foi tratado termicamente.

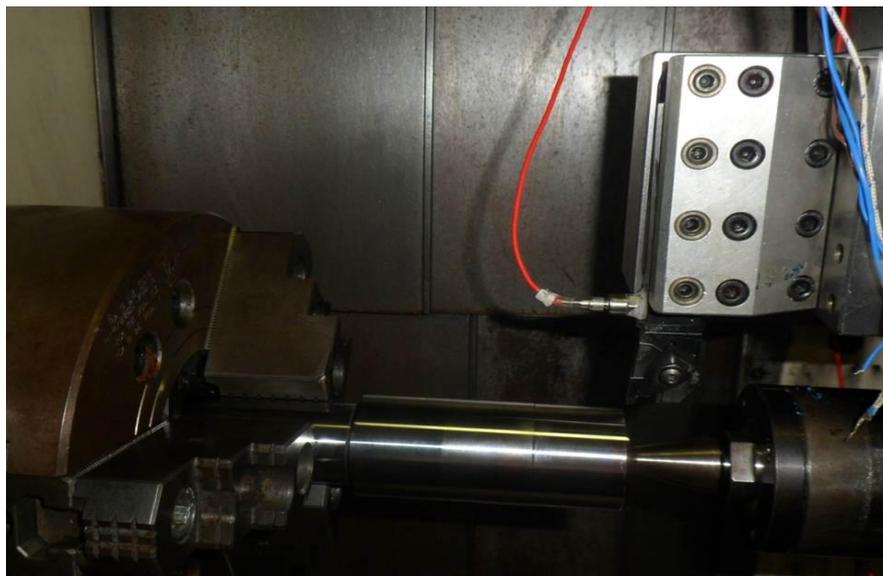
A composição química do aço ABNT H13 utilizado no presente estudo (em peso. %) pode ser verificado na Tab. 1.

Tabela 1. Composição do aço ABNT H13

Elemento	C	Mn	Si	Cr	V	Mo
% em peso	0,37 - 0,42	0,20 - 0,50	0,80 - 1,20	5,00 - 5,50	0,80 - 1,20	1,20 - 1,75

Para o processo desenvolvido neste estudo, um torno CNC torno MHP Kingsbury. As inserções são de ferramentas cerâmicas, CC 650, com geometria ISO CNGA 120408T01020. O porta-ferramenta foi um DCLNL 2020K12. A geometria de corte utilizada nos ensaios foi a seguinte: ângulo de saída (α) 6°; ângulo de ataque (γ) -6°; ângulo de posição da aresta principal de corte (χ) 95°; ângulo de inclinação da aresta de corte (λ) -6°. O desgaste da ferramenta foi monitorado através de um microscópio óptico com uma câmera digital, com 40 X ampliação. Fig. 1 mostra uma fotografia da região experimental da máquina e da ferramenta feita durante a experiência.

Figura 1. Processo de Torneamento Duro



4. Metodologia de ensaios

Nos ensaios realizados foram adotados dois níveis de variação para cada um dos parâmetros de usinagem estudados. A Tab. 2 apresenta os três fatores: velocidade de corte, avanço de corte, profundidade de corte e seus respectivos níveis de variação. Os níveis foram especificados em função de dados recomendados pelo catálogo do fabricante das ferramentas (Sandvik, 2010) e também foi elaborado um planejamento fatorial (três parâmetros e dois níveis e um ponto central) para a realização dos ensaios.

Tabela 2. Variáveis de controle.

Variáveis de Controle	Símbolo	Níveis				
		-1.682	-1	0	1	1.682
Velocidade de Corte (m/min)	Vc	57,39	100	150	225	267,61
Avanço de Corte (mm/rev)	f	0.06	0.10	0.15	0.225	0.27
Profundidade de usinagem (mm)	ap	0.09	0.15	0.225	0.33	0.39

Os ensaios de torneamento foram dimensionados de forma a proporcionar uma maneira precisa de se estudar a influência da velocidade de corte, avanço de corte e profundidade de corte na rugosidade (R_a , R_t) da peça usinada, através da aplicação da metodologia de superfície de resposta.

Foi adotado como critério de troca de ferramenta, principalmente valores de rugosidade ($Ra < 0,5$) μm e vários valores de desgaste de flanco VB_{max} . A cada corpo de prova usinado, o mesmo era retirado da máquina para medição das rugosidades. Neste momento o inserto também era retirado do suporte para monitoramento do desgaste de flanco (VB_{max}).

5. Resultados e Discussões

A matriz experimental do projeto fatorial completo com cinco pontos centrais e os resultados da rugosidade Ra e Rt são mostradas na Tab. 3. Observa-se que os parâmetros de rugosidades Ra e Rt obtidos nos ensaios para o aço ABNT H13 foram relativamente baixos, visto que o avanço (f) variou de 0,2 a 0,4 mm/v. A rugosidade média Ra ficou na faixa de 0,15-0,5 μm e a rugosidade máxima Rt ficou na faixa de 1-2,7 μm . Justificam-se estes resultados pelo material da ferramenta e pela alta dureza da peça na faixa de 54 HRC.

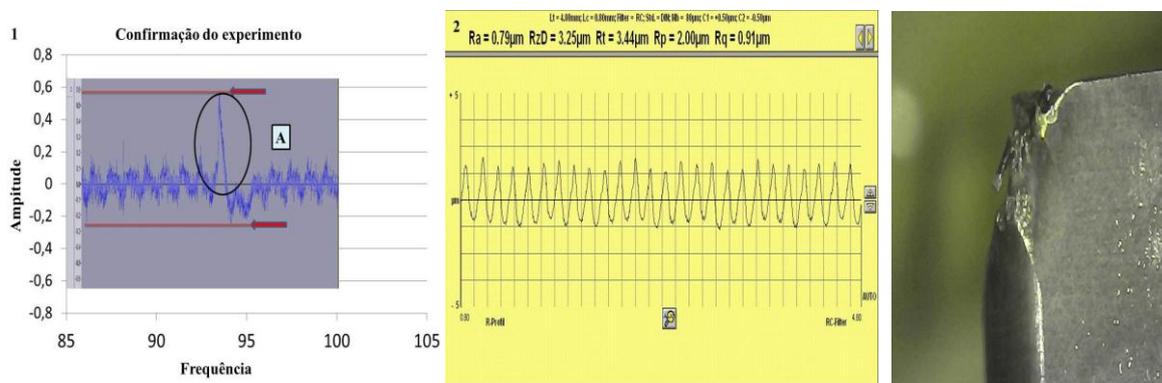
Fatorial completo 2^3 para as respostas de rugosidades (Ra, Rt)

Teste	Parametros			Respostas	
	V_c m/min	f mm/rev	ap mm	Ra μm	Rt μm
1	-1	-1	-1	0,13	1,08
2	+1	-1	-1	0,09	0,76
3	-1	+1	-1	0,52	3,17
4	+1	+1	-1	0,26	1,34
5	-1	-1	+1	0,14	1,20
6	+1	-1	+1	0,12	1,36
7	-1	+1	+1	0,48	2,30
8	+1	+1	+1	0,45	2,40
9	-1.682	0	0	0,29	2,04
10	+1.682	0	0	0,15	1,08
11	0	-1.682	0	0,12	0,66
12	0	+1.682	0	0,54	2,36
13	0	0	-1.628	0,15	1,12
14	0	0	+1.682	0,15	1,96
15	0	0	0	0,15	1,08
16	0	0	0	0,16	1,08

17	0	0	0	0,14	1,07
18	0	0	0	0,17	1,07
19	0	0	0	0,16	1,09

O primeiro experimento foi realizado usando uma $V_c = 300$ m /min, $f = 0,10$ mm / rev e $a_p = 0,10$ mm. Verifica-se que ocorreu uma falha de amplitude (A). Este pico (A) foi provocado pela quebra da ferramenta. A Fig. 2 mostra que a rugosidade R_a foi de $0,79$ μ m.

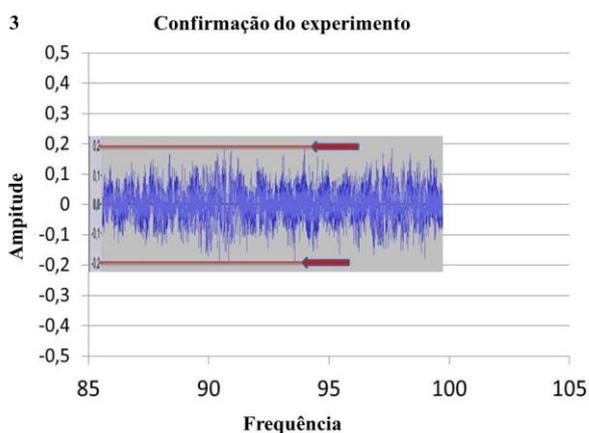
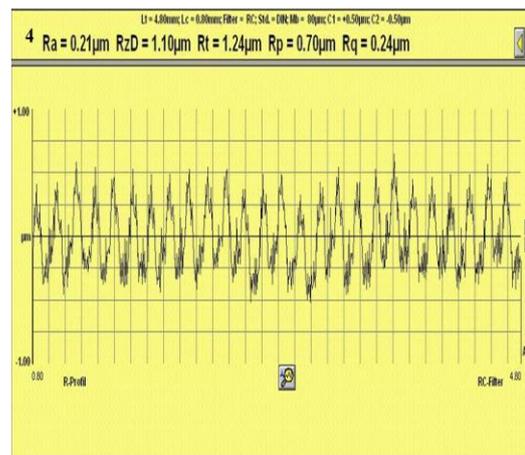
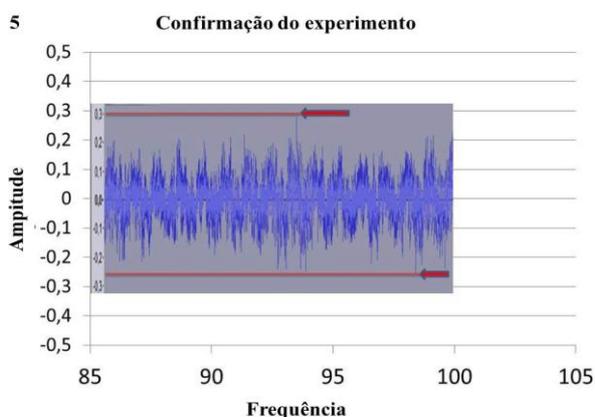
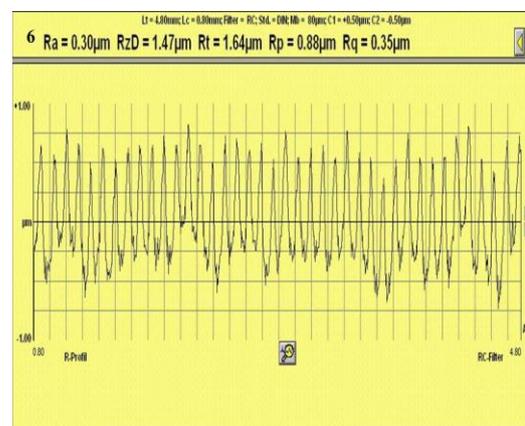
Figura 2. Confirmação do experimento



A Fig. 3 mostra os valores de amplitude na faixa de 0,2 % usando valores de $V_c = 225$ m /min, $f = 0,15$ mm / rev e $a_p = 0,10$ mm e a Fig. 4 mostra medida de rugosidade R_a na faixa de $0,2$ μ m. Da mesma maneira a Fig. 5 mostra os valores de amplitude na faixa de 0,3 % usando valores de $V_c = 150$ m /min, $f = 0,225$ mm / rev e $a_p = 0,15$ mm e a Fig. 6 mostra a medida de rugosidade R_a na faixa de $0,3$ μ m. Não seria possível mostrar todos os ensaios realizados, e por esta razão foram selecionados apenas dois experimentos com uma nova ferramenta.

Figura 3. Confirmação da amplitude

Figura 4. Confirmação da rugosidade


Figura 5. Confirmação da amplitude

Figura 6. Confirmação da rugosidade Ra


As experiências descritas nas seções anteriores mostram a eficácia do método de monitoramento de som para monitorar um sistema de manufatura. O sistema pode distinguir os sons de movimentos da máquina e os sons de usinagem, que lhe permitam acompanhar toda a sequência de operação. O sistema também é capaz de reconhecer, em certa medida, as diferenças nas condições de corte, bem como discriminar a usinagem de som de uma ferramenta quebrada. À medida que o sistema de monitoração de som se destina a detectar uma grande variedade de ocorrências anormais, é necessário utilizar métodos de controle complementares para lidar com problemas individuais que são críticos e que ocorrem com frequência. Vital para alcançar um sistema de monitoramento confiável para a fabricação é a integração de outras informações disponíveis fornecidas pelos sensores de propósito específicos. A metodologia de superfície de resposta foi uma tentativa de organizar os valores dos fatores, evitando as vibrações causadas pela excessiva velocidade de corte e velocidade de avanço.

O resultado dos ensaios mostra uma elevada taxa de reconhecimento de movimentos do equipamento e as várias operações de usinagem.

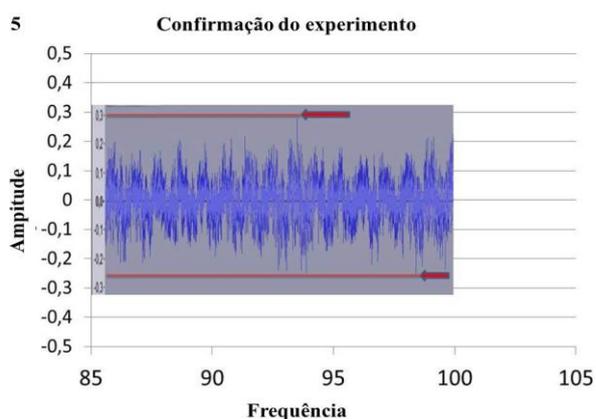


Figura 5. Confirmação da amplitude
 6. Conclusões

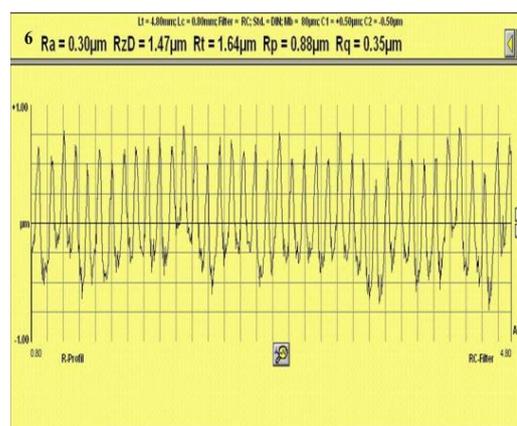


Figura 6. Confirmação da rugosidade Ra

Para monitorar o sucesso de um processo de fabricação, ele precisa de simplicidade, robustez e confiabilidade. O estudo tentou chegar a um sistema de monitorização simples utilizando o software Audacity. No entanto, que institui a robustez e confiabilidade deste sistema para a aplicação prática ainda requer um estudo mais aprofundado.

Com base nos resultados, podemos chegar às seguintes conclusões:

- Análise de usinagem utilizando a metodologia de superfície de resposta é capaz de investigar a influência de cada parâmetro nas respostas obtidas.
- A geometria da ferramenta permitiu a obtenção de uma baixa rugosidade Ra na gama de 0,15-0,67 μm e rugosidade Rt na gama de 1,56 a 4.12 μm com velocidade de avanço relativamente mais elevados (até 0,1 0,23 mm /rev).
- O fator que mais influencia a rugosidade Ra é a velocidade de avanço, seguido pela interação $V_c \times V_c$ e $f \times f$, que não pode ser descartado no processo.
- A escolha dos valores dos fatores foi determinante para a obtenção de uma usinagem com pouca interferência do ruído.
- Em todas as experiências, o sistema de monitorização provou confiável para a obtenção de uma análise de rugosidade de acordo com as amplitudes apresentados, o que foi verificado pelos valores medidos.
- Com este tipo de monitoramento, foi possível identificar, de uma forma simples, as ocorrências anormais que ocorrem na usinagem de materiais endurecidos, que incluem: máquina e peça; quebra e desgaste da ferramenta, e mudanças nos parâmetros de velocidade de corte, velocidade de avanço e profundidade de corte.

- O desenvolvimento de um sistema de monitorização é inevitável a fim de minimizar o custo global de produção, o tempo de produção, o tempo de máquina, e o desperdício de material.

7. Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da CAPES, FAPEMIG e CNPq para a realização deste trabalho.

8. Referências

Asiltürk, I., Akkus, H. Determining the effect of cutting parameters on surface roughness in hard turning using the Taguchi method. *J. Int. Measur. Conf* 44: p. 1697-1704. 2011.

Abellan, N.J.V., Subirón F.R. A review of machining monitoring systems based on artificial intelligence process models. *Int. J. Mach. T. & Manufac* 47: p. 237-257. 2010.

Azouzi, R., & Guillot, M. On-line prediction of surface finish and dimensional deviation in turning using neural network based sensor fusion. *Int. J. Mach. T. & Manufac* 37: p.1201-1217. 1997.

Bartarya, G, Choudhury S. K. State of the art in hard turning. *Int. J. Mach. T. & Manufac* 53: p. 1-14. 2012.

Box, G.E.P., Hunter, W.G., Hunter, J.S., *Statistics for Experimenters*. New York, John Wiley & Sons. 1978.

Campos, P. H. S.; Davim, J. P.; Ferreira, J. R.; Paiva, A. P.; Balestrassi, P. P. *The Machinability of Hard Materials A Review. Machinability of Advanced Materials*. 45ed.: 1ed.London, UK: John Wiley & Sons, Ltd, , Vol. 1, p. 145-174, 2014.

Cus, F., Zuperl, U. Approach to optimization of cutting conditions by using artificial neural networks, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 175, Issue 3, p. 281-290. 2006.

Davim, J. P. *Machine of Hard Materials*, Springer: London, 2011.

Dimla, D. E. Lister P. M. On-line metal cutting tool condition monitoring. I: force and vibration analyzes. *Int. J. Mach. T. & Manufac* 40: 739-768. 2000.

Diniz, A.; Marcondes, F. C.; Coppini, N. L. *Tecnologia da usinagem dos materiais*. (9ª ed.). São Paulo: Artliber, 2014.

- Iskra, P., Hernandez R. E. Toward a process monitoring of CNC wood router. Sensor selection and surface roughness prediction. *W. Sci. Tech* 46: 115-128. 2012.
- Kurada, S, Bradley C.A. Machine vision system for tool wear assessment. *Tribol. Int* 30: 295–304. 1997.
- Montgomery, D.C., Design and Analysis of Experiments. John Wiley & Sons. 2004.
- Ozel, T, Karpat, Y. Predictive modeling of surface roughness and tool wear in hard turning using regression and neural networks. *Int. J. Mach. T. & Manufac* 45: 467-479. 2005.
- Prvan, T., Street, D. J. An annotated bibliography of application papers using certain classes of fractional factorial and related designs. *Journal of Statistical Planning and Inference*, n.106, p.245-269. 2002.
- Quintana, G., Ciurana, J. Chatter in machining processes: A review. *Int. J. Mach. T. & Manufac*, 51: 363-376. 2011.
- Rech, J, Moison, A. Surface integrity in finish hard turning of case hardened steels. *Int. J. Mach. T. & Manufac* 43: 543-550. 2003.
- Sandvik-Coromant. Technology machining of metals. Technical Manual. Sandviken, Sweden. 2010.
- Shaw, M. Metal Cutting Principles, Oxford University Press, New York, USA, p. 672. 2004.
- Siddhpura, A., Paurobally, R. A review of flank wear prediction methods for tool condition monitoring in a turning process. *Int. J. Mach. T. & Manufac* 65: 371-393. 2013.
- Suresh, R., Basavarajappa, S, Gaitonde, V.N, Samuel, G.L, Davim, J.P. State-of-the-art research in machinability of hardened steels, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: J. Eng. Manufac* 227(2): 191-209. 2013.
- Taguchi, G. System of Experimental Design, UNIPUB, Kraus International Publications, New York. 1986.
- Takata, S., Ahn J. H., Miki, M., Miyaoc, Y., Sata, T., 1986, A Sound Monitoring System for Fault Detection of Machine and Machining States. *Annals of the CIRP* 35: 289-292.
- Xiaoli, L. Review a brief review: Acoustic emission methods for tool wear monitoring during turning”, *Int. J. Mach. T. & Manufac* 42: 157-165. 2002.
- Xiong, J, Guo Z, Yang M, Wan W, Dong, G. Tool life and wear of WC–TiC–Co ultrafine cemented carbide during dry cutting of AISI H13 steel. *Ceram. Int* 39: 337-346. 2013.
- Yan, H, Hua, J., Shivpuri, R. Flow stress of AISI H13 die steel in hard machining. *Mater. and Des* 28: 272-277. 2007.

Zhou, Y., Orban P, Nikum, S. Sensors for intelligent machining-a research and application survey. In: Systems, man and cybernetics. IEEE int. conf. on int. sys 2: 1005–1010. 1995.