

MONITORAMENTO INSTANTÂNEO DA QUALIDADE SUPERFICIAL DE PEÇAS DE MADEIRA USINADAS EM PROCESSO DE FRESAMENTO

Cleverson Pinheiro, cleversonpi@gmail.com^{1,2}

Manoel Cléber de Sampaio Alves, manoelcsa@feg.unesp.br¹

Marcos Valério Ribeiro, mvalerio@feg.unesp.br¹

Simone Simões Amaral, simonesimoessi@gmail.com³

Marcel Yuzo Kondo, yuzokondo@gmail.com¹

¹Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, UNESP – Univ. Estadual Paulista, Departamento de Materiais e Tecnologia, Avenida Ariberto Pereira da Cunha, 333, Bairro Pedregulho, CEP 12.516-410, Guaratinguetá, São Paulo, Brasil.

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Campus de Jacareí, Rua Antônio Fogaça de Almeida, 200, Jardim Elza Maria - CEP: 12.322-030, Jacareí, São Paulo, Brasil.

³Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, UNESP – Univ. Estadual Paulista, Departamento de Energia, Avenida Ariberto Pereira da Cunha, 333, Bairro Pedregulho, CEP 12.516-410, Guaratinguetá, São Paulo, Brasil.

Resumo: O monitoramento da qualidade superficial da madeira usinada pode ser realizado pelo método de contato por apalpamento mecânico, através de rugosímetro. Entretanto, este método demanda um certo tempo para a mensuração da rugosidade. Alternativas são necessárias para proporcionar mais agilidade a esta atividade. Uma alternativa seria utilizar as medições indiretas, em tempo real. Pesquisas evidenciam que a qualidade do acabamento superficial da madeira pode estar relacionada com a potência consumida durante o processo. Com isto, o objetivo deste estudo foi analisar a possibilidade de utilização da potência consumida pela usinagem, no monitoramento da qualidade superficial das peças de madeira usinadas. Foram planejadas condições experimentais, utilizando o método de Taguchi, que pudessem provocar diferenças de qualidade no acabamento, mensuráveis por medidas de rugosidade. Amostras da espécie *Pinus elliottii* foram climatizadas em estufas automáticas com controle de umidade e temperatura até a obtenção de três níveis de teor de umidade. Foram realizadas usinagens por fresamento em corpos de provas de madeira em diferentes teores de umidade, no sentido de corte concordante e discordante, utilizado um centro de usinagem com comando numérico, equipado com uma fresa de metal duro integral, com três cortes helicoidais positivos. A potência de corte consumida no fresamento, em cada condição experimental, foi calculada com dados coletados de corrente elétrica, consumida instantaneamente. Foi medida a rugosidade das peças em cada condição, com o auxílio de um rugosímetro. Não ocorreram diferenças estatisticamente significativas na potência consumida, para os fatores analisados, apesar de terem sido verificadas diferenças em relação à rugosidade das peças. Estes resultados eliminam, em uma primeira análise, a possibilidade de utilização da variação da potência de corte consumida, no monitoramento instantâneo da qualidade superficial das peças de madeira.

Palavras-chave: Teor de umidade, Sentido de corte, Qualidade superficial, Potência de corte, Taguchi.

1. INTRODUÇÃO

Segundo Elmas et al. (2011) os sistemas de medição de perfil para obter características de superfície podem ser divididos em dois grupos principais - os métodos de contato e sem contato. Zhong, Hiziroglu e Chan (2013), Hiziroglu et al. (2013) e Ayrilmis, Benthien e Thoemen (2012) acrescentam que atualmente não existe um método padrão aceito para determinar a rugosidade da superfície de madeira e de produtos derivados de madeira.

Para Elmas et al. (2011) o método mais comum de obtenção de dados de perfil de superfície, considerando contato direto com a peça usinada, é a utilização do contato mecânico do perfilômetro de ponta em toda a superfície, rastreando o movimento da ponta para obter informações do perfil. De acordo com Islam et al. (2011) e Jeyapoovan e Murugan (2013) os sistemas de medição do perfil da superfície têm sido amplamente utilizados em várias indústrias de processos para a avaliação do acabamento superficial e do desgaste da ferramenta de corte.

Alguns autores como Kilik, Hiziroglu e Burdurlu (2006), Zhong, Hiziroglu e Chan (2013) e Hiziroglu et al. (2013) perceberam em seus estudos que o perfilômetro de ponta é um método apropriado para análise da superfície de produtos madeiros.

Jeyapoovan e Murugan (2013) argumentam que apesar do perfilômetro de ponta ser convencionalmente utilizado na medição da rugosidade da superfície, este método não é adequado para medições em linha de produção, uma vez que este processo de medição é invasivo e é do tipo de contato. Havendo uma necessidade crescente de um método confiável, online e sem contato para medições de superfície.

Segundo Zhong, Hiziroglu e Chan (2013), a rugosidade da superfície de madeira e produtos de madeira pode ser facilmente determinada com valores numéricos usando várias técnicas indiretas.

Foi pensando na afirmação de Jeyapoovan e Murugan (2013) sobre um método alternativo *online* que possibilite aumentar a agilidade nas medições da qualidade superficial de uma peça usinada de uma maneira menos invasiva, e utilizando-se também do que foi dito por Zhong, Hiziroglu e Chan (2013) quando afirmam que a rugosidade da superfície de madeira e produtos de madeira pode ser facilmente determinada com valores numéricos usando várias técnicas indiretas é que surge a ideia de utilizar uma medição que possa verificar quando a qualidade no acabamento da madeira usinada começa a diminuir. Com isto, a proposta deste trabalho é de verificar a possibilidade da utilização da variação da potência consumida na usinagem em tempo real, pelo processo de fresamento, no monitoramento da qualidade de usinagem, garantindo a qualidade superficial das peças de madeira usinadas. No entanto, é necessário variar proposital e significativamente a qualidade do acabamento das peças usinadas de madeira, verificando se a variação da potência consumida se faz sensível a esta variação no acabamento.

Segundo a literatura, alguns fatores influenciam na qualidade do acabamento final na usinagem da madeira, entre eles estão os parâmetros de corte, características da ferramenta de corte e o teor de umidade. Na sequência são apresentadas pesquisas realizadas sobre as particularidades do processo de usinagem da madeira e os principais fatores influentes do processo. Estes estudos, auxiliaram na escolha dos fatores e seus níveis, proporcionando a variação necessária da qualidade superficial das peças de madeira usinadas.

Segundo Gonçalves (2000) no fresamento convencional ou discordante (*up-milling*), as ferramentas movem-se contrariamente ao movimento da peça, enquanto que no fresamento concordante (*down-milling*) a ferramenta e a peça se movimentam na mesma direção. Este tipo de classificação somente vale no fresamento cilíndrico tangencial, de grande utilização no beneficiamento de madeiras. Este pesquisador determinou uma considerável influência do sentido de corte sobre as forças de usinagem e consequentemente sobre a qualidade superficial. Ele verificou que o corte perpendicular às fibras requer maior energia para ser efetuado que o corte ao longo das fibras, e, portanto, no corte perpendicular às fibras, a força de corte tende a ser maior que no corte paralelo às fibras, podendo trazer consequências favoráveis ou não a qualidade do acabamento realizado pelo processo de usinagem.

Segundo Silva, Lima e Trugilho (2007) a madeira é anisotrópica, podendo ser usinada em diferentes planos e de diferentes maneiras, em função da direção e sentido de ataque da ferramenta em relação às fibras.

Teixeira et al. (2011) estudaram a influência da anisotropia da madeira no desgaste das ferramentas diamantadas, para estes pesquisadores, existem dois fatores importantes que afetam significativamente o processo de usinagem da madeira, a irregularidade estrutural natural das madeiras e o teor de umidade. A irregularidade na disposição das fibras e os veios provocam uma anisotropia em suas propriedades. Com a redução da umidade, alguns elementos químicos existentes na seiva acabam ficando cristalizados entre as fibras, afetando a atuação das ferramentas de corte nos processos de usinagem.

Segundo Zenid (2009), várias propriedades da madeira são afetadas pelo teor de umidade das peças. Considera-se a madeira seca quando o seu teor de umidade está em equilíbrio com a umidade relativa do ambiente onde a madeira será utilizada. Nesta situação, as propriedades mecânicas são superiores e a movimentação dimensional é menor do que quando a madeira está verde.

Vários autores apresentam comentários sobre a influência do teor de umidade no processo de usinagem da madeira, como Kollman et al. (1984) apud Lucas Filho (2004), Ferronho 2006, Jankowsky (1990) apud Rosso (2006), Néri (2003), Gonçalves (2000).

Kollman et al. (1984) apud Lucas Filho (2004), citou o teor de umidade como uma das propriedades físicas de grande influência na usinabilidade da madeira. Este autor explica que, a força de corte diminui quando o teor de umidade é aumentado. Esse efeito, segundo eles, pode ser justificado pela absorção de água na parede celular, aumentando o espaço entre as células e diminuindo assim a resistência mecânica da madeira a teores de umidade elevados. Por outro lado, quando a teores de umidade muito baixos (madeira seca), ou seja, umidade abaixo do ponto de saturação das fibras, há uma redução dos espaços submicroscópicos entre as células formadoras da parede celular, aumentando a rigidez da mesma e com isso, aumentando a resistência mecânica de modo exponencial.

Segundo Néri (2003) a umidade afeta as propriedades mecânicas da madeira, e, por conseguinte, as forças desenvolvidas no processo de usinagem. A madeira seca requer um maior esforço para o corte do que a madeira verde (com umidade acima do ponto de saturação das fibras), devido à contração volumétrica na secagem e o aumento das propriedades de resistência.

Para Gonçalves (2000) vários são os fatores que interferem sobre as forças e a potência de usinagem, nas diferentes operações de corte da madeira, afetando o desempenho de corte das ferramentas, como teor de umidade, densidade e direcionamento das fibras (referente à madeira) e espessura de corte, velocidade de corte e geometria da ferramenta (referente ao processo).

Silva et al. (1999) estudaram as relações entre a anatomia da madeira e a qualidade da usinagem e acabamento da superfície e concluíram que em qualquer operação de usinagem as fibras da madeira são arrancadas e, raramente, cortadas. Este efeito pode ser explicado pela grande dimensão das arestas de corte das ferramentas em relação às dimensões das fibras. As fibras apresentam dimensões, geralmente, menores que os raios das arestas das ferramentas

utilizadas na usinagem, principalmente quando são utilizados materiais que não permitem a confecção de arestas muito “vivas”. Neste caso as fibras da madeira são raspadas ou arrancadas e não cortadas.

Dada a importância do teor de umidade da madeira e do parâmetro de usinagem sentido de corte, estes foram escolhidos para provocar a diferença de qualidade de acabamento necessário ao estudo, que tem por objetivo analisar a utilização variação da potência consumida na usinagem em tempo real, pelo processo de fresamento, no monitoramento da qualidade de usinagem, garantindo a qualidade superficial das peças de madeira usinadas.

Espera-se, portanto, que com as mudanças nos níveis de umidade e sentido de corte, conforme os estudos apresentados, provoquem variações de qualidade de acabamento, e essas variações tragam um efeito significativo nos níveis de potência consumida durante o processo de usinagem.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Climatização dos corpos de prova destinados ao fresamento

Setenta e dois corpos de prova da espécie *Pinus elliottii* com dimensões nominais de (315 x 65 x 23) mm foram divididos em três grupos iguais e colocados em estufas climatizadoras automáticas. Onde foi possível controlar o teor de umidade e temperatura do ambiente. O objetivo da climatização foi obter três classes de umidade ($8\% \leq x < 12\%$; $12\% \leq x < 16\%$; $16\% \leq x < 20\%$).

A verificação do teor de umidade das peças de madeira foi realizada por medições constantes do teor de umidade de cada corpo de prova através do método capacitivo, utilizando um medidor capacitivo portátil.

2.2. Equipamentos e procedimentos utilizados no ensaio de usinagem

Para a usinagem dos corpos de prova foi utilizado um centro de usinagem (Fig. (1)). Trata-se de uma máquina com controle numérico computadorizado (CNC) que trabalha unicamente com madeira ou materiais com atributos físicos semelhantes.



Figura 1. Centro de usinagem de madeira

Foi utilizada uma fresa de metal duro integral (Fig. (2)), com as seguintes especificações: $D = 16\text{ mm}$, $L = 90\text{ mm}$, $I = 35\text{ mm}$, $S = 16\text{ mm}$, com três cortes helicoidais positivos com ângulo de hélice de 20° , ângulo de folga de 4° , ângulo de cunha de 66° e ângulo de saída de 20° . Estes ângulos foram obtidos pela medição de imagem utilizando o software Solid Edge ST5.

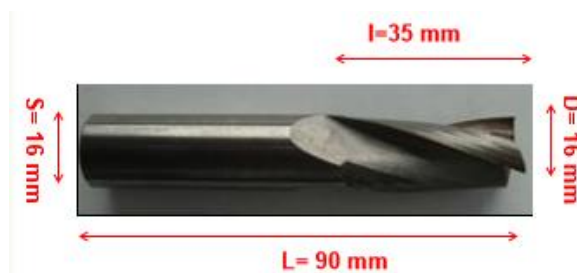


Figura 2. Fresa de metal duro com cortes helicoidais para acabamento. Identificação de suas dimensões básicas (D, L, I e S)

Os parâmetros de usinagem adotados, são apresentados na Tab. (1).

Tabela 1. Valores dos parâmetros utilizados nos ensaios de usinagem

Parâmetro	Valor	Unidade
Rotação da ferramenta	15000	Rotação por minuto
Penetração de trabalho (a_e)	1	Milímetro
Diâmetro da ferramenta	16	Milímetro
Velocidade de corte	10,56	Metros por segundo
Velocidade de avanço	2	Metros por minuto
Avanço por dente	0,04	Milímetro
Largura de corte (a_p)	30	Milímetros
Ângulo de cunha lateral da ferramenta (β_f)	66	Graus
Ângulo de saída lateral da ferramenta (γ_f)	20	Graus
Ângulo de folga lateral da ferramenta (α_f)	4	Graus
Ângulo de hélice da ferramenta (ϕ)	20	Graus

O centro de usinagem foi pré-programado para realizar seis repetições consecutivas de usinagem para cada sentido de corte em cada um dos 36 corpos de prova selecionados (12 de cada classe de teor de umidade). Dada às dimensões do corpo de prova de (315 x 65 x 23) mm, uma primeira usinagem sempre era realizada em todo o comprimento do corpo de prova, a fim de eliminar possíveis desalinhamentos proporcionados pela fixação do corpo de prova no suporte. A ferramenta retornava totalmente a posição inicial e iniciava o processo de usinagem primeiramente com seis usinagens no sentido discordante e depois com mais seis usinagens no sentido concordante, interrompendo automaticamente a operação ao final da usinagem conforme a programação pré-definida. A cada repetição de usinagem, uma área usinada de (25 x 30) mm era gerada no corpo de prova (Fig. (3)).



Figura 3. (a) corpo de prova após a usinagem, com a demonstração da largura de corte; (b) corpo de prova com os sentidos de corte e as repetições das usinagens.

2.3. Captação da variação de corrente elétrica para determinação da potência consumida

A potência de corte consumida foi obtida através da captação da variação da corrente elétrica utilizando-se de um transformador da marca Renz, modelo RH-40, com redução de 25A (ampères) para 5 A (Fig. (4 a)), este transformador reduziu a corrente que foi coletada pelo sensor de efeito Hall da marca LEM, modelo AT B10 (Fig. (4 b)), que realiza a medição eletrônica de correntes de onda em corrente alternada, ele possui saída de tensão 0-10V DC proporcional ao valor RMS (Root Medium Square ou Raiz Média Quadrada) da corrente primária. Este sensor de efeito Hall foi conectado externamente aos cabos de alimentação do motor responsável pela rotação da ferramenta, para a captação da variação da corrente elétrica. O sinal de diferença de potencial gerada pela corrente foi captado pelo sensor de efeito Hall e coletada pela placa de aquisição de dados.

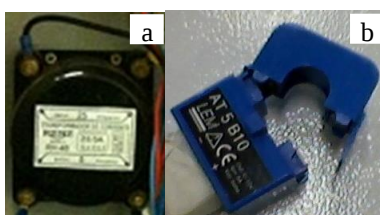


Figura 4. (a) transformador de corrente; (b) sensor de efeito Hall.

2.4. Coleta e armazenamento de dados de corrente elétrica

A variação da corrente elétrica na usinagem foi adquirida instantaneamente para cada usinagem efetivamente realizada no corpo de prova, a uma taxa de 400 pontos por segundo através do sensor de efeito Hall instalados no centro de usinagem. O sensor de efeito Hall foi conectado a um módulo de canais da marca National Instruments modelo BNC-2120 (Fig. (5 b)), e este conectado a placa de aquisição de dados marca National Instruments modelo NI PCI 6220 (Fig. (5 c)) inserida do computador de aquisição de dados posicionado ao lado do centro de usinagem (Fig. (5 a)). Os sinais adquiridos através da placa foram processados e armazenados através de um programa pré-elaborado no software LABVIEW versão 7.1 (Fig. (5 d)).

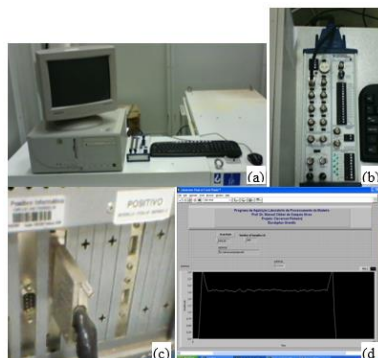


Figura 5. (a) computador para aquisição de dados; (b) módulo de canais; (c) placa de aquisição de dados e (d) tela do software LabView, com o sinal sendo coletado.

A potência consumida foi calculada utilizando-se da Eq. (1), o sinal adquirido (em U_{CC}) a uma taxa de 400 pontos por segundo foi transformado na unidade de potência (watts).

$$P_{ap3F} = U \times i \times \sqrt{3} \times \cos \varphi \quad (1)$$

Onde:

P_{ap3F} = potência aparente para motores trifásicos, em watts;

U = tensão de uma das fases, em volts;

i = corrente alternada de uma das fases, em ampère;

$\cos \varphi$ = fator de potência.

Como o sinal adquirido pelo sistema tem uma saída proporcional em volts é necessário converter o valor de volts para ampères para que se possa aplicar esse valor na Eq. (1). O fabricante do transdutor de corrente alternada fornece essa equação para a transformação do dado adquirido em volts para ampères, porém, como foi necessário utilizar um transformador de corrente de redução 25A/5A, a variável U_{CC} foi multiplicada por 5 (Eq. (2)).

$$i = \frac{U_{CC} \times 5}{2} \quad (2)$$

Onde:

i = corrente, em ampères;

U_{CC} = Tensão de corrente contínua, em volts.

Substituindo-se na Eq. 1, o valor da corrente (Eq. (2)), o valor da tensão de fase do motor da ferramenta (220 V) e o fator de potência ($\cos \varphi = 0,92$) do motor, obtêm-se a Eq. (3), que foi utilizada para transformar o sinal adquirido em volts para potência consumida em watts.

$$P_{ap3F} = \frac{U_{CC} \times 5}{2} \times 220 \times \sqrt{3} \times 0,92 \quad (3)$$

2.5. Determinação da rugosidade da madeira usinada

As rugosidade das peças foi determinada pelo rugosímetro da marca Taylor Robson, modelo Surtronic 25+, de haste de medição com ponta apalpadora cone esférico de diamante, raio de ponta de 2 μm . Foram levantados os parâmetros de rugosidade: desvio aritmético médio (R_a) e a altura total do perfil (R_t), para a avaliação da superfície usinada. Foi utilizado o filtro Gaussiano Robusto.

O comprimento de amostragem (L_e) ou λ_c "cut-off" foi de 2,5 mm. Os valores de rugosidade (R_a e R_t) para 36 corpos de prova foram obtidos simultaneamente.

2.6. Planejamento experimental pelo método de Taguchi

O delineamento experimental utilizado para a combinação dos níveis dos fatores de entrada, na análise da potência consumida (watts) e rugosidade da madeira usinada (R_a e R_t) foram: 1 fator (teor de umidade) com três níveis (3^1) e 1 fator (sentido de usinagem) com dois níveis (2^1), organizados pela matriz ortogonal de Taguchi L18 ($1^3 \times 2^1$) como apresentado na Tab. (2).

Com as seis usinagens consecutivas em cada sentido de corte foi obtido uma média, sendo esta considerada o valor “resposta” de uma repetição da referida condição experimental, portanto, foram realizadas 12 repetições para cada condição experimental.

Tabela 2. Valores dos parâmetros utilizados nos ensaios de usinagem

Fator:	Níveis		
	1	2	3
Sentido de corte	Concordante	Discordante	
Teor de umidade (%)	$8 \leq U < 12$	$12 \leq U < 16$	$16 \leq U < 20$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Análise gráfica do efeito dos fatores na média para a potência consumida

Através da análise da Fig. (6), observa-se que as médias de potência consumida ficaram abaixo da média geral para a combinação do sentido de corte concordante e teor de umidade no nível 1 e 3, sendo este o menor valor. Percebe-se ainda um comportamento não linear da potência para o fator teor de umidade, para o nível de teor de umidade mais baixo (nível 1) a média da potência consumida é menor que a média geral, passando para o teor de umidade intermediário (nível 2) a média da potência consumida ficou acima da média geral e no teor de umidade mais alto (nível 3) a média da potência consumida diminuiu drasticamente ficando no nível mais baixo de todos. Através destas análises gráficas nota-se que a melhor combinação para a redução da potência consumida é o sentido de corte concordante com o teor de umidade no nível 1 ou 3, ficando a escolha da melhor combinação, a critério da qualidade superficial, que como foi apresentado, obteve as menores rugosidades no teor de umidade no nível 1. Parece, de maneira geral, que existe uma tendência de diminuição da potência consumida, com o aumento do teor de umidade.

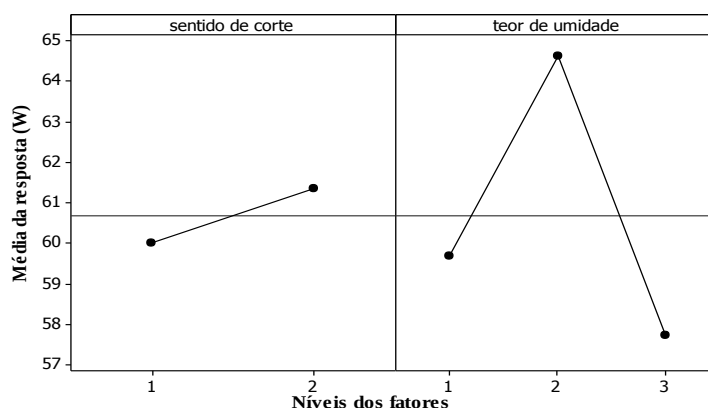


Figura 6. Efeitos principais dos fatores sobre as médias de potência consumida

Entretanto, estas afirmações se baseiam na análise gráfica e precisam ser testadas com a utilização da análise de variância no nível de significância de 5 %, para a confirmação ou não da influência dos fatores sobre a potência consumida.

3.2. Análise de variância (anova) para os efeitos dos fatores na média para potência consumida

A análise de variância para os efeitos dos fatores sobre as médias para a potência consumida foi utilizada para verificar até que ponto as diferenças apresentadas graficamente, entre os diferentes níveis dos fatores foram estatisticamente significativas. Observando a Tab. (3) (ANOVA) para as médias da potência consumida, conclui-se que para um nível de significância de 5 % que as diferenças entre os níveis do fator: sentido de corte não foram

estatisticamente significativas, pois p-value foi igual a 0,779. O mesmo pode ser observado para o fator: teor de umidade (p-value foi igual a 0,510).

Tabela 3. Análise de variância para as médias da potência consumida

Fonte de variação	SQ	GL	SMQ	F	P
Sentido de corte	2,689	1	2,689	0,100	0,779
Teor de umidade	50,372	2	25,189	0,960	0,510
Erro residual	52,495	2	26,248		
Total	105,556	5			

Legenda: Soma dos quadrados dos efeitos (SQ), o número de graus de liberdade (GL), soma média quadrática (SMQ), estatística F (razão entre SMQ e a SMQ erro) e o resultado de p-valor.

Este resultado evidencia que as alterações provocadas nos fatores de entrada não puderam ser sentidas significativamente pelas variações da potência consumida. É possível que as alterações provocadas nos fatores foram pequenas e insignificantes em relação a potência disponível para motores do centro de usinagem.

3.3. Análise gráfica do efeito dos fatores na média para a R_a

É possível notar, pela Fig. (7), que as condições que forneceram as menores rugosidades R_a foram: Sentido de corte no nível 2 (discordante) e Teor de umidade no nível 1 (menor que 12 %). Percebe-se principalmente que o parâmetro de rugosidade R_a aumenta com o aumento do teor de umidade da madeira.

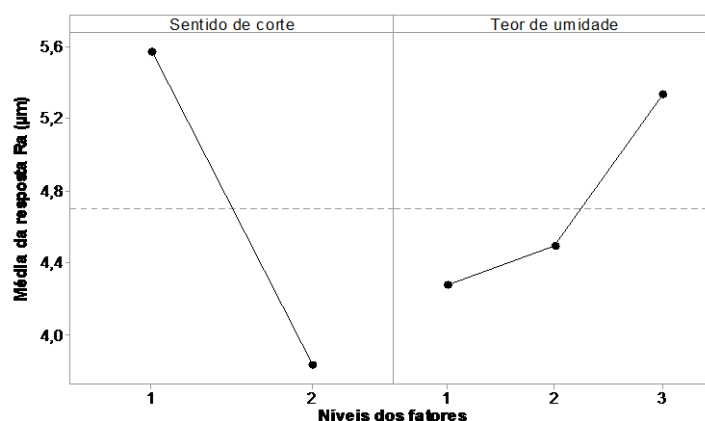


Figura 7. Efeitos principais dos fatores sobre as médias de rugosidade R_a

3.4. Análise de variância (anova) para os efeitos dos fatores na média para a rugosidade R_a

Observando a Tab. (4) (ANOVA) para as médias das rugosidades R_a , conclui-se que para um nível de significância de 5 % que as diferenças de rugosidades apresentadas referentes aos níveis do fator sentido de corte foram estatisticamente significativas, entretanto, analisando o efeito do fator teor de umidade, as diferenças de rugosidade referentes aos níveis de teor de umidade não foram estatisticamente significativas, apesar de um valor de p-value (0,265) não tão elevado e valor da estatística $F=2,78$.

Tabela 4. Análise de variância para as médias do parâmetro de rugosidade R_a

Fonte de variação	SQ	GL	SMQ	F	P
Sentido de corte	4,5603	1	4,5603	20,30	0,046
Teor de umidade	1,2478	2	0,6239	2,78	0,265
Erro residual	0,4493	2	0,2246		
Total	6,2573	5			

Legenda: Soma dos quadrados dos efeitos (SQ), o número de graus de liberdade (GL), soma média quadrática (SMQ), estatística F (razão entre SMQ e a SMQ erro) e o resultado de p-valor.

Segundo Phadke (1989) a relação de variância, denotada por F é a razão entre o quadrado médio devido ao fator e o quadrado médio de erro. Um grande valor de F significa que o efeito desse fator é grande em comparação com a variância de erro. Além disso, quanto maior o valor de F , mais provável que o fator esteja influenciando a resposta do

processo. Assim, os valores de F podem ser usados para classificar a ordem dos fatores. Ainda segundo este autor, um valor de F menor que 1 significa que o efeito do fator é menor que o erro do modelo aditivo. Um valor de F maior que 2 significa que o efeito do fator não é pequeno, enquanto que maior que 4 significa que o efeito do fator é grande, portanto, valores da estatística F maiores que 2 necessitam atenção, não podem ser simplesmente descartados.

3.5. Análise gráfica do efeito dos fatores na média para a R_t

É possível notar, pela Fig. (8), que as condições que forneceram as menores rugosidades R_t foram: Sentido de corte no nível 2 (discordante) e Teor de umidade no nível 1 (menor que 12 %). Percebe-se principalmente que o parâmetro de rugosidade R_t , assim como o R_a , aumenta com o aumento do teor de umidade da madeira.

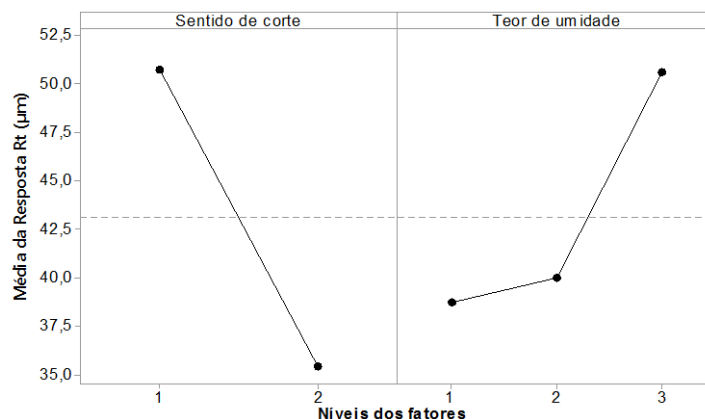


Figura 8. Efeitos principais dos fatores sobre as médias de rugosidade R_t

Comparando as Fig. (6), (7) e (8), observa-se que a maior potência consumida foi obtida no sentido de corte discordante e que justamente neste sentido de corte, ocorreram as menores rugosidades, ainda comparando estas figuras, observa-se que com o aumento do teor de umidade, aumenta-se a rugosidade (R_a e R_t) e de maneira geral tende-se a reduzir a potência consumida.

3.6. Análise de variância (anova) para os efeitos dos fatores na média para a rugosidade R_t

Observando a Tab. (5) (ANOVA) para as médias das rugosidades R_t , conclui-se que para um nível de significância de 5 % que as diferenças de rugosidades apresentadas referentes aos níveis do fator sentido de corte e níveis do fator teor de umidade não foram estatisticamente significativas, entretanto, apesar de valores não tão elevados de p-value (0,098 para o sentido de corte e de 0,320 para o teor de umidade) e valores da estatística F consideráveis, levando em consideração as colocações apresentadas sobre o valor da estatística F, no item 3.4.

Tabela 5. Análise de variância para as médias do parâmetro de rugosidade R_t

Fonte de variação	SQ	GL	SMQ	F	P
Sentido de corte	352,41	1	352,41	8,71	0,098
Teor de umidade	171,80	2	85,90	2,12	0,320
Erro residual	80,89	2	40,45		
Total	605,11	5			

Legenda: Soma dos quadrados dos efeitos (SQ), o número de graus de liberdade (GL), soma média quadrática (SMQ), estatística F (razão entre SMQ e a SMQ erro) e o resultado de p-valor.

4. CONCLUSÃO

Conforme esperado, mudanças nos níveis dos fatores de entrada (Sentido de corte e Teor de umidade), resultaram em mudanças consideráveis e até mesmo estatisticamente significativas na qualidade superficial das peças de madeira usinadas, em termos dos parâmetros de rugosidade analisados, entretanto, mudanças nestes mesmos fatores de entrada não resultaram em mudanças sensíveis na potência consumida pelo processo de usinagem.

Alterações provocadas nos fatores de entrada não puderam ser sentidas significativamente pelas variações da potência consumida. É possível que as alterações provocadas nos fatores foram pequenas e insignificantes em relação a potência disponível para motores do centro de usinagem.

Em uma primeira análise fica descartado o monitoramento instantâneo da qualidade superficial de peças de madeira usinadas, pelo acompanhamento instantâneo da potência consumida, pois alterações nos fatores de entrada que resultam em mudanças significativas na qualidade superficial, não geram mudanças significativas na potência consumida.

5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho contou com apoio da seguinte entidade: CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

6. REFERÊNCIAS

- Ayrilmis, N., Benthien, J.T., Thoemen, H. Effects of formulation variables on surface properties of wood plastic composites. *Composites Part B: Engineering*, v. 43, n. 2 p. 325-331, 2012.
- Diniz, A. E.; Marcondes, F. C.; Coppini, N. L. “Tecnologia da Usinagem dos Materiais”. 8. ed. São Paulo: Art Liber, 2013. 272 p.
- Elmas, S., Islam, N., Jackson, M.R., Parkin, R.M. Analysis of profile measurement techniques employed to surfaces planed by an active machining system. *Measurement*, v. 44, p. 365-377, 2011.
- Gonçalves, M. T. T. Processamento da Madeira. Bauru, SP. 245p, 2000.
- Hiziroglu, S., Zhong, Z.W, Tan, H.L. Measurement of bonding strength of pine, kapur and meranti wood species as function of their surface quality. *Measurement*, v. 46, p. 3198-3201, 2013.
- Jeyapoovana, T., Murugan, M., Surface roughness classification using image processing. *Measurement*, v. 46, p. 2065–2072, 2013.
- Kilic, M., Hiziroglu, S., Burdurlu. Effect of machining on surface roughness of wood. *Building and Environment*, v. 41, p. 1074-1078, 2006.
- Lucas filho, F. C.. Análise da usinagem da madeira visando a melhoria de processos em indústrias de móveis. 2004. 176 f. Tese (Doutorado) - 2004.
- Néri, A. C.. Parâmetros de corte de usinagem de madeiras de reflorestamento. 2003. 154 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Agrícola, Departamento de Construções Rurais e Ambiente, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.
- Phadke, M. S. Quality engineering using robust design, 1st edition, New York, Prentice Hall, 1989, 333 p.
- Rosso, S.. Qualidade da madeira de três espécies de Eucalyptus resultante da combinação dos métodos de secagem ao ar livre e convencional. 2006. 91 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Florestal, Departamento de Centro de Ciências Naturais, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Maria, 2006.
- SILVA, J. R. M.; MENDES, L. M.; TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T. Preparação de superfícies de madeira e derivados para receber acabamento. *Boletim Agropecuário*, Lavras, v. 28, p.05-26, 1999.
- Teixeira, C. R., Casanova, C. A. M., Ferreira Filho, D., Fernandes, J. A., Balzaretti, N. M. Influência da anisotropia da madeira no desgaste das ferramentas diamantadas. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 6, 2011, Caxias do Sul: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas 2011.
- Zenid, J. G. IPT (Org.). Madeira: uso sustentável na construção civil. 2 ed. São Paulo, 2009. 99 p.
- Zhong, Z.W. hiziroglu, S., Chan, C.T.M. Measurement of the surface roughness of wood based materials used in furniture manufacture. *Measurement*, v. 46, p.1482-1487, 2013.

7. DIREITOS AUTORAIS

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

INSTANT MONITORING OF SURFACE QUALITY OF THE PIECES OF WOOD MACHINED BY MILLING PROCESS

Cleverson Pinheiro, cleversonpi@gmail.com^{1,2}
Manoel Cléber de Sampaio Alves, manoelcsa@feg.unesp.br¹
Marcos Valério Ribeiro, mvalerio@feg.unesp.br¹
Simone Simões Amaral, simonesimoessi@gmail.com³
Marcel Yuzo Kondo, yuzokondo@gmail.com¹

¹College of Engineering of Guaratinguetá, UNESP - Univ Estadual Paulista, 333, Ariberto Pereira da Cunha Avenue, Guaratinguetá, São Paulo, Brazil, Department of Materials and Technology.

²Institute of Education, Science and Technology of São Paulo, 200 Antônio Fogaça de Almeida street, Jacareí, São Paulo, Brazil.

³College of Engineering of Guaratinguetá, UNESP - Univ Estadual Paulista, 333, Ariberto Pereira da Cunha Avenue, Guaratinguetá, São Paulo, Brazil, Department of Energy.

Summary: *The monitoring of the surface quality of machined wood can be accomplished by contact method by mechanical probing, through roughness tester. However, this method requires some time to measure roughness. Alternatives are needed to provide more agility to this activity. One possibility would be the indirect measurements, in real-time. Searches show that the surface quality of the machined wood may be related with the power consumed during the process. With this, the aim of this study was to analyze the use of the power consumed by machining, in monitoring the quality of machined parts. Experimental conditions, using the Taguchi method, that might cause differences in the final quality, were planned and measures by roughness tester. Samples of the species *Pinus elliottii* were air-conditioned in greenhouses with automatic control of humidity and temperature until the obtaining of three levels of moisture content. Samples in different wood moisture content levels were machined, using the down-milling and up-milling methods in machining center with numerical control, equipped with a carbide cutter, with three positive helical cuts. The power consumed in the milling, in each experimental condition, was calculated with data collected from electric current, consumed instantly. The roughness was measured in each condition, with the aid of a roughness tester. Differences statistically significant were not observed in power consumption, to the factors analyzed, although they have been observed differences in relation to the roughness of the samples. These results eliminate, in a first analysis, the possibility of using the variation of cutting power consumption, monitoring snapshot of the surface quality of the pieces of wood.*

Keywords: moisture content, the cutting direction, surface quality, cutting Power, Taguchi.