

Dióxido de carbono em forma de névoa na refrigeração da ferramenta de corte, durante a usinagem da madeira

Carbon dioxide in fog form to refrigerate the cut tool during wood machining

Marcelo Gozeloto^I Raquel Gonçalves^{II}

RESUMO

A concentração de calor na superfície da madeira, resultante do seu processamento mecânico, promove o desgaste prematuro da ferramenta de corte, com consequente efeito sobre o acabamento do material processado, ocasionando o aparecimento de regiões carbonizadas sobre a superfície, bem como provocando maior rugosidade superficial do que as observadas em procedimentos de usinagem com ausência de calor concentrado. O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da refrigeração da ferramenta de corte na qualidade da superfície da madeira usinada. O mecanismo adotado foi a utilização de dióxido de carbono, em forma de névoa, aplicado diretamente na região em processo de usinagem, de modo que esse fluido atuasse como refrigerante do processo de corte. Para os ensaios, foram adotados madeira de *Eucalyptus grandis* e operação de corte com serra circular. Para avaliar o estado superficial, adotaram-se, como parâmetros, a rugosidade e a ocorrência de carbonização da superfície. Os resultados mostraram que a aplicação do dióxido de carbono, mesmo em pequenos níveis de vazão (15g min^{-1} ou 30g min^{-1}), reduziu a carbonização superficial do material processado, bem como os valores de rugosidade superficiais.

Palavras-chave: processamento da madeira, rugosidade da madeira, usinagem da madeira.

ABSTRACT

Heat concentration from wood cutting process promotes the tool premature wear, with consequent effect on the surface processed material, causing burnt areas as well as provoking larger superficial roughness than observed in machining process with absence of accumulated heat. The objective of this research was to evaluate the effect of cutting tool refrigeration during wood machining. The adopted mechanism was the use of pressurized carbon dioxide in fog form applied directly in the cutting area as a refrigeration

method. The test was performed using *Eucalyptus grandis* and as cutting tool, a circular saw. To evaluate the wood final surface the following parameters were adopted; superficial roughness and occurrence of surface carbonization. The results showed that carbon dioxide applied in fog form, even at the smallest level (15g min^{-1}), avoided the superficial carbonization of the processed material, as well as reduced the values of superficial roughness.

Key words: cutting wood, wood roughness, wood machining.

INTRODUÇÃO

A madeira é um material higroscópico e isolante térmico. Essas características, combinadas ou atuando de forma isolada, impedem que o calor gerado durante os procedimentos de usinagem seja dissipado, uma vez que sua condição de isolante dificulta a dissipação natural. Por outro lado, a adoção de fluidos de cortes convencionais à base de água e óleo torna-se inadequada. A concentração de calor resultante promove a redução da vida útil das arestas cortantes das ferramentas de corte em favorecimento das condições para a adesão de película de material residual processado sobre as superfícies da ferramenta de corte. Como consequência, as peças apresentam, após os procedimentos de usinagem, estado superficial com excesso de rugosidade e carbonização. Em ambos os casos, a correção do problema, quando possível, resulta em necessidade de operações adicionais na superfície dos materiais processados, tais como os lixamentos, que oneram a produção e/ou reduzem a qualidade do produto final.

^IFaculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI), Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Centro Tecnológico da Madeira e Mobiliário (SENAI Itatiba), Campinas, SP, Brasil.

^{II}FEAGRI, UNICAMP, 13083-875, Campinas, SP, Brasil. E-mail: raquel@feagri.unicamp.br. Autor para correspondência.

Trabalhos realizados com o objetivo de avaliar o desgaste da ferramenta de corte durante a usinagem de madeira, com dentes de diamante policristalino, apresentaram bons resultados, mesmo sem o uso de refrigeração, uma vez que o inserto policristalino é mais nobre do que os metais duros usualmente empregados nas ferramentas. Esses insertos possuem propriedades de condutividade térmica e de resistência à abrasão que reduzem os problemas causados pela temperatura, mas, em contrapartida, são muito mais onerosos (PHILBIN & GORDON, 2005), o que tornaria seu uso inviável para grande parte do setor madeireiro nacional.

Praticamente toda a energia mecânica associada à formação do cavaco durante o processo de usinagem se transforma em energia térmica (calor). As principais fontes geradoras são a deformação e o cisalhamento do cavaco no plano de cisalhamento, o atrito do cavaco com a ferramenta e o atrito da ferramenta com a peça em processo de usinagem (CALDEIRANI, 1996). Para materiais com grandes coeficientes de transferência térmica, a maior parte do calor gerado é dissipada pelo cavaco, sobretudo, quando são aplicadas grandes velocidades de corte. Entretanto, esse processo não ocorre na usinagem da madeira, que possui coeficiente de transferência térmica de $0,1 \text{ Wm}^{-2} \cdot \text{K}$, valor muito baixo quando comparado, por exemplo, com o coeficiente do aço ABNT 1020, que é de $50 \text{ Wm}^{-2} \cdot \text{K}$. Assim, o baixo coeficiente de transferência térmica da madeira faz com que o calor gerado durante o processo de usinagem não seja eliminado pelos cavacos originados no processo, nem se dissipe pela peça em fabricação, permanecendo e concentrando-se sobre as arestas da ferramenta de corte. O aumento da geração de calor e, conseqüentemente da temperatura, acelera e é acelerado pelo desgaste da ferramenta, ocasionando defeitos visíveis na madeira processada. Os principais efeitos observáveis a olho nu são traços de queimadura por onde ocorre a passagem da ferramenta de corte e a aspereza excessiva da parte usinada, característica particular de processos de usinagem nos quais as ferramentas rompem bruscamente as fibras que compõem o material usinado. Este último dano é ocasionado pela perda do fio de corte da ferramenta, conhecido também por desgaste de flanco, que acontece em função do aumento da carga térmica concentrada sobre a aresta da ferramenta (FERRARESI, 1977; DINIZ et al., 2001).

A rugosidade é um parâmetro aceito para controle e qualificação de superfícies após processos de usinagem e pode ser definida como sendo desvios apresentados em uma superfície, produzidos pelo contato da ferramenta de corte ou pela abrasão, e com

influência sobre a formação do cavaco (SIQUEIRA et al., 2003). Os parâmetros de medição de rugosidade são divididos em três classes: aqueles que se baseiam na medida da profundidade da rugosidade, os que se baseiam em medidas horizontais e os que se baseiam em medidas proporcionais. A medição desses parâmetros pode ser realizada por diferentes métodos, dentre eles o que utiliza equipamento denominado rugosímetro (SIQUEIRA et al., 2003). O rugosímetro é um equipamento eletrônico que contém agulha de diamante que entra em contato com a superfície da peça, registrando as oscilações. Dentro dos parâmetros que se baseiam em profundidade, define-se R_a como sendo a média aritmética dos valores absolutos das distâncias entre os picos e vales encontrados dentro da região amostrada (*cut-off*) e R_y como sendo o maior valor obtido entre os picos e vales de cada *cut-off*. A grande dificuldade na medição da rugosidade da madeira com o rugosímetro relaciona-se com seus elementos anatômicos que prejudicam a leitura do aparelho, fazendo com que as medições apresentem alto coeficiente de variabilidade (SIQUEIRA et al., 2003).

No Brasil, o *Eucalyptus grandis* tem uso intenso devido à excelente resposta silvicultural da espécie, como o rápido crescimento, além de propriedades desejáveis para usos múltiplos, como massa específica média, grã reta, usinabilidade e boa aceitação de acabamento (TOMASELLI, 2000). A espécie apresenta boa adaptação em quase todas as regiões do Brasil, com elevado potencial silvicultural e plantios em larga escala. As árvores apresentam formas que permitem a obtenção de toras adequadas para a produção de madeira serrada, além de apresentarem massa específica ideal para a produção de artigos do mobiliário e embalagens agrícolas e industriais (ROCHA, 2000).

Considerando os aspectos mencionados, o objetivo deste trabalho foi avaliar se o mecanismo de refrigeração utilizando névoa carbônica reduz a carbonização superficial do material processado e os valores de rugosidade superficiais.

MATERIAL E MÉTODOS

Corpos-de-prova de 20 x 150 x 450[mm] de espessura, largura e comprimento, respectivamente, foram confeccionados a partir de vigas de *Eucalyptus grandis*, as quais foram secas ao ar. Todos os corpos-de-prova foram climatizados em câmara climática com controle de temperatura e umidade relativa de modo a ajustar a umidade a $12 \pm 1\%$. Para a confecção dos corpos-de-prova, foram utilizados desengrossadeira para o desdobro da madeira, plana para o acabamento

e fechamento das medidas das faces do corpo-de-prova e serra de fita para o corte dos corpos-de-prova no comprimento.

Os corpos-de-prova foram submetidos à usinagem mecânica em esquadrejadeira, com base horizontal deslizante em guias paralelas e potência de 7,5cv, na qual foi acoplada lâmina de serra circular fabricada em aço ABNT 1040, com 32 dentes em Carbetto de Tungstênio (WC), classe K-10, largura de 4mm e altura de 8mm, diâmetro externo de 350mm e furo central de fixação de 20mm. Para os ensaios sem refrigeração e com refrigeração, foram adotadas duas lâminas de serras circulares idênticas, visando evitar que o desgaste da serra fosse um fator de interferência na avaliação do efeito da refrigeração. Os cortes foram realizados no sentido paralelo ao comprimento dos corpos-de-prova.

A refrigeração foi realizada utilizando-se cilindros com dióxido de carbono liquefeito e dutos e válvulas reguladoras de fluxo e pressão para o transporte e a aplicação do dióxido de carbono. A direção e o ângulo de aplicação da névoa carbônica foram objetos de avaliação preliminar. Dessa forma, o mecanismo de aplicação da névoa carbônica foi montado para que o jato fosse aplicado a 45° e na mesma direção do avanço do corte. O mecanismo de refrigeração apresentado na figura 1, para ilustrar o sistema utilizado, corresponde a ensaios realizados em tupia (cujos resultados não fazem parte do objetivo deste artigo). A referida foto foi apresentada para ilustrar o mecanismo, uma vez que, no caso do serramento circular, houve necessidade de colocação de anteparo durante os ensaios, o que dificultou a obtenção de

foto que mostrasse, de forma mais clara, o sistema de refrigeração em funcionamento.

Após a realização dos procedimentos de usinagem com refrigeração e sem refrigeração, foram avaliadas as superfícies com a medição da rugosidade Ra (rugosidade média) e Ry (rugosidade máxima) e a avaliação de ocorrência da carbonização da superfície por onde a ferramenta de corte realizou o trabalho de usinagem. A medição da rugosidade dos corpos-de-prova foi realizada na região central do comprimento da superfície obtida pelo corte. Para cada corpo-de-prova, foram realizadas medições de rugosidade, todas tomadas no sentido paralelo às fibras do material processado. O valor final adotado foi a média de três medições.

Os parâmetros variáveis para a realização dos ensaios foram a velocidade de corte (V_c), adotada em três níveis, e a vazão do fluido de corte (Q), adotada em quatro níveis. Como parâmetros constantes, a velocidade de avanço foi fixada em 150mm min^{-1} e a profundidade de corte em 20mm. Embora as velocidades adotadas não sejam usuais nos processos de usinagem da madeira, que normalmente são muito superiores, a adoção desses valores se deu para acelerar os desgastes das arestas de corte da ferramenta, uma vez que proporciona elevados atritos.

O planejamento experimental adotado foi o fatorial completo com uma réplica, totalizado assim 288 ensaios (24 corpos-de-prova usinados em diferentes condições de vazão do fluido refrigerante e de velocidade de corte) (Tabela 1). Foram agregados grupos de condições do experimento de modo que fosse possível comparar, aos pares, cada nível dos



Figura 1 - Mecanismo de refrigeração em funcionamento.

Tabela 1 - Planejamento experimental

Fatores	Quantidade de níveis	Valor de cada nível	Código
Velocidade de corte (Vc)	3	3846,50m min ⁻¹	A
		4945,50m min ⁻¹	B
		6044,50m min ⁻¹	C
Vazão do fluido de corte (Q)	4	15g min ⁻¹	1
		30g min ⁻¹	2
		45g min ⁻¹	3
		Sem fluido de corte	4

fatores com a usinagem de corpos-de-prova e sem o mecanismo de refrigeração.

Os valores da rugosidade Ra e Ry, bem como a verificação da ocorrência da carbonização das superfícies que tiveram contato com a ferramenta de corte, foram comparados para as operações com e sem uso de refrigeração. Utilizando o Programa computacional Statgraphics, os resultados de rugosidade foram inicialmente avaliados quanto à normalidade da distribuição. Uma vez comprovada a possibilidade de aceitação da distribuição normal em nível de significância de 5%, verificou-se a influência dos fatores por meio da análise de variância, dos gráficos de pareto e da superfície de contorno da resposta.

A carbonização da superfície foi avaliada conforme a porcentagem de área carbonizada em relação à superfície total usinada. Para os diferentes níveis de porcentagem, foram adotados conceitos conforme a seguinte convenção: Conceito K=70%; Conceito J = entre 50% e 70%; Conceito I = entre 40% e 50%; Conceito H = entre 30% e 40%; Conceito G = entre 20% e 30%; Conceito F = entre 10% e 20%; Conceito E = menor que 10% e Conceito D = ausência de área carbonizada.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados médios obtidos de medições de rugosidades Ra e Ry, bem como a averiguação da ocorrência da carbonização da superfície que teve contato com a ferramenta de corte, são apresentados na tabela 2.

Verificou-se, pelos resultados obtidos, que os efeitos da presença ou não de refrigeração e da vazão de fluido refrigerante não são independentes da velocidade de corte. No entanto, a análise da variância demonstrou que a velocidade de Corte (Vc) não foi significativa quando considerada de forma independente, enquanto o fator vazão (Q) sempre influenciou o estado superficial final dos corpos-de-prova usinados, tanto

em termos de rugosidade Ra e Ry, quanto em termos de carbonização da superfície usinada (Tabelas 3, 4 e 5). As tabelas 3, 4 e 5 indicam, ainda, respectivamente que a rugosidade Ra foi estatisticamente diferente somente

Tabela 2 - Resultados médios de medições de rugosidade dos corpos-de-prova em diferentes posições e avaliação da ocorrência da carbonização da superfície usinada. Condição de usinagem: as letras correspondem à velocidade de corte (A = 3846,50m min⁻¹; B= 4945,50m min⁻¹ e C = 6044,50m min⁻¹), e o número corresponde à vazão (1 = 15g min⁻¹; 2 = 30g min⁻¹; 3 = 45g min⁻¹; 4 = sem refrigeração), de acordo com os níveis do planejamento experimental.

Condição de usinagem	Ra (µm)	Ry (µm)	Área carbonizada
A1	3,89	18,92	E
réplica	4,91	20,81	F
A2	4,06	12,22	E
réplica	3,59	21,80	E
A3	5,11	22,21	D
réplica	4,66	23,09	D
A4	3,14	22,38	H
réplica	6,17	23,09	H
B1	2,37	15,74	E
réplica	3,89	21,61	E
B2	3,97	21,87	D
réplica	3,68	24,62	E
B3	4,75	22,61	E
réplica	4,46	20,79	E
B4	3,74	23,89	H
réplica	4,59	19,67	G
C1	2,02	16,63	F
réplica	2,50	16,16	F
C2	2,00	19,72	E
réplica	2,10	20,40	E
C3	4,17	17,44	D
réplica	3,96	16,87	E
C4	4,30	22,85	H
réplica	4,35	20,56	I

Ra = rugosidade média; Ry = rugosidade máxima.
Conceitos de Área Carbonizada (AC)- D: AC = 0%; E: AC < 10%, F: 10% ≤ AC < 20%; G: 20% ≤ AC < 30%; H: 30% ≤ AC < 40%; I: 40% ≤ AC < 50%; J: 50% ≤ AC < 70%; K: AC > 70%.

Tabela 3 - Análises estatísticas relativas ao parâmetro rugosidade Ra.

-----Tabela de ANOVA – Análise de Variância-----				
Fator	Soma Quadrados	Quadrado Médio	Fator F	P-valor
Vazão	5,00368	1,66789	4,96	0,0110
Velocidade	0,650358	0,325179	0,97	0,3988
Resíduos	6,04814	0,336008		
Total	11,7022			
-----Teste de Grupos Homogêneos (Multiple Range Test)-----				
Vazão	Média (µm)		Grupos homogêneos	
3 (45g min ⁻¹)	2,19		X	
1 (15g min ⁻¹)	2,49		X	
2 (30g min ⁻¹)	2,70		X	
4 (sem refrigeração)	3,43		X	

X coincidentes indicam que os fatores são iguais.

Tabela 4 - Análises estatísticas relativas ao parâmetro rugosidade Ry.

-----Tabela de ANOVA – Análise de Variância-----				
Fator	Soma Quadrados	Quadrado Médio	Fator F	P-valor
Vazão	241,81	80,6034	5,64	0,0066
Velocidade	3,48126	1,74063	0,12	0,8860
Resíduos	257,063	14,2813		
Total	502,354			
-----Teste de Grupos Homogêneos (Multiple Range Test)-----				
Vazão	Média (µm)		Grupos homogêneos	
3 (45g min ⁻¹)	11,86		X	
2(30g min ⁻¹)	14,5		XX	
1 (15g min ⁻¹)	19,0		XX	
4 (sem refrigeração)	19,5		X	

X coincidentes indicam que os fatores são iguais.

Tabela 5 - Análises estatísticas relativas ao parâmetro Área Carbonizada (AC).

-----Tabela de ANOVA – Análise de Variância-----				
Fator	Soma Quadrados	Quadrado Médio	Fator F	P-valor
Vazão	5766,67	1922,22	30,53	0,0000
Velocidade	433,333	216,667	3,44	0,0543
Resíduos	1133,33	62,963		
Total	7333,33			
-----Teste de Grupos Homogêneos (Multiple Range Test)-----				
Vazão	Média % de área carbonizada		Grupos homogêneos	
3 (45g min ⁻¹)	5,0		X	
2(30g min ⁻¹)	8,33		X	
1 (15g min ⁻¹)	10		X	
4 (sem refrigeração)	43,3		X	

X coincidentes indicam que os fatores são iguais.

quando não houve refrigeração; a rugosidade R_y foi reduzida a partir da vazão de 30g min^{-1} e a porcentagem de área carbonizada (AC) foi estatisticamente diferente somente quando não houve refrigeração.

Observando-se os valores de forma isolada, verifica-se que, de maneira geral, a vazão de 15g min^{-1} já foi suficiente para reduzir a rugosidade. Além disso, os resultados evidenciaram que, em velocidade de corte intermediária, a adição do dióxido de carbono no maior nível de vazão (45g min^{-1}), apesar de proporcionar melhor rendimento de transferência térmica, resultou em aumento da rugosidade superficial, indicando que a adoção de vazão muito grande do gás pode piorar a condição de rugosidade da superfície usinada. Esse resultado é decorrente do excesso de cristais de dióxido de carbono nas proximidades da região de usinagem, que aumentam a turbulência e dificultam o escoamento dos cavacos formados.

Em termos de carbonização da superfície, ficou evidente que a ausência da refrigeração resultou, em todas as velocidades, em corpos-de-prova com maior incidência de área carbonizada durante o processo de corte do material. Nesse caso, de forma

geral, as vazões de 30 e 45g min^{-1} foram as que apresentaram melhores resultados. No entanto, com a consequência negativa na rugosidade em alguns casos, o melhor efeito geral pode ser considerado o obtido com vazão de 30g min^{-1} . Para qualquer nível de vazão, na presença da refrigeração, nenhuma peça usinada apresentou mais do que 20% da superfície com problemas de queima. A análise de variância relacionada aos resultados da carbonização das superfícies usinadas confirmou, estatisticamente, que o dióxido de carbono influi na diminuição da incidência desse tipo de defeito. A figura 2 apresenta exemplos de rugosidade e carbonização na superfície usinada com e sem presença do gás refrigerante.

CONCLUSÕES

Ocorreu redução significativa da carbonização da madeira usinada, independente do nível de vazão do fluido. Em relação à rugosidade da superfície usinada, houve redução mesmo para a menor vazão de fluido (15g min^{-1}), embora não se possa considerar a independência da velocidade de corte nesse caso.

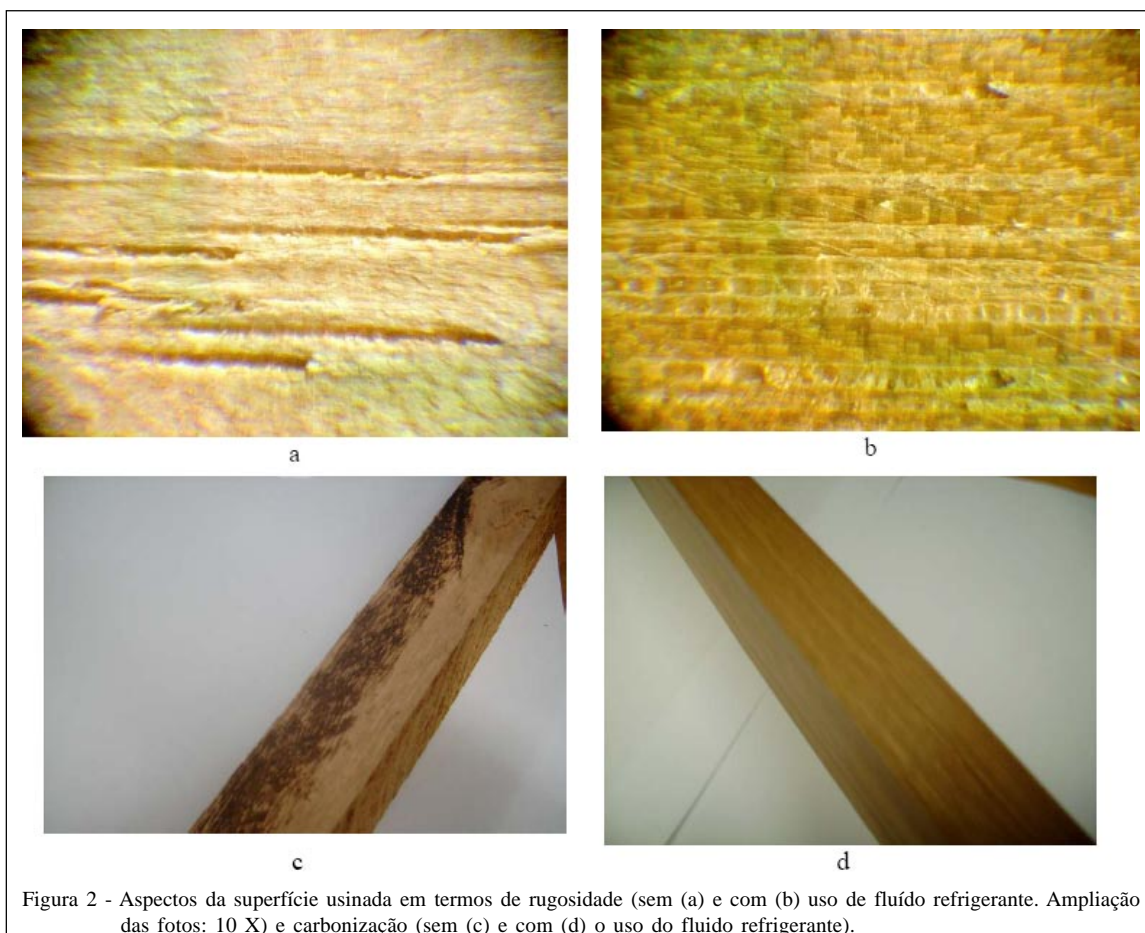


Figura 2 - Aspectos da superfície usinada em termos de rugosidade (sem (a) e com (b) uso de fluido refrigerante. Ampliação das fotos: 10 X) e carbonização (sem (c) e com (d) o uso do fluido refrigerante).

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio financeiro para o desenvolvimento da Pesquisa, e à Escola SENAI Luiz Scavone, pela disponibilização das máquinas de corte, da madeira e das máquinas para a confecção dos corpos-de-prova e do espaço para realização dos ensaios.

REFERÊNCIAS

- CALDEIRANI F, J. ET AL. Influência da ductilidade do material da peça na temperatura de corte e na força de usinagem. In: CONGRESSO DE ENGENHARIA MECÂNICA DO NORTE-NORDESTE, 4., 1996, Recife, PE. **Anais...** Recife: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas (ABCM), 1996. V.1, p.407-412.
- DINIZ, A.E. et al. **Tecnologia da usinagem dos materiais** . 3.ed. São Paulo: Artliber, 2001. 254p.
- FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. 11.ed. São Paulo: Edgadr-Blücher, 1977. 796p.
- PHILBIN, P.; GORDON, S. Characterisation of the wear behaviour of polycrystalline diamond (PCD) tools when machining wood-based composites. **Journal of Materials Processing Technology**, v.162/163, p.665-672, 2005. On line. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6TGJ-4FVCC0D-4&_user=687358&_rdoc=1&_fmt=&_orig=search&_sort=d&view=c&_acct=C000037899&_version=1&_urlVersion=0&_userid=687358&md5=a874a2a2c520f55e3bd1060602510a3f>. Disponível em: 10.1016/j.jmatprotec.2005.02.085.
- ROCHA, M.P. ***Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden e *Eucalyptus dunnii* Maiden como fontes de matéria-prima para serrarias**. 2000. 157f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR
- TOMASELLI, I. As perspectivas para o setor florestal Brasileiro. **Revista Referência**, v.2, n.3, p.28, 2000.
- SIQUEIRA, K.P. ET AL. Principais metodologias de medição de estado de superfícies. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, v.5, n.2, p.203-210, 2003.