

**QUALIDADE DE SUPERFÍCIES USINADAS EM  
MADEIRA DE *Toona ciliata* M. Roem**

**LÍVIA DE CARVALHO SORAGI**

**2009**

**LÍVIA DE CARVALHO SORAGI**

**QUALIDADE DE SUPERFÍCIES USINADAS EM MADEIRA DE *Toona ciliata* M. Roem**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração em Processamento e Utilização da Madeira, para a obtenção do título de “Mestre”.

Orientador  
Prof. Dr. José Reinaldo Moreira da Silva

LAVRAS  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2009

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da  
Biblioteca Central da UFLA**

Soragi, Livia de Carvalho.

Qualidade de superfícies usinadas em madeira de *Toona ciliata*  
M. Roem / Livia de Carvalho Soragi. – Lavras : UFLA, 2009.  
61 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2009.

Orientador: José Reinaldo Moreira da Silva.

Bibliografia.

1. Processamento da madeira. 2. Análise de qualidade de  
superfícies. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 674.835

**LÍVIA DE CARVALHO SORAGI**

**QUALIDADE DE SUPERFÍCIES USINADAS EM MADEIRA DE *Toona ciliata* M. Roem**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração em Processamento e Utilização da Madeira, para a obtenção do título de “Mestre”.

APROVADA em 9 de dezembro de 2009

Prof. Dr. Roberto Alves Braga Júnior

UFLA

Prof. Dr. Fábio Akira Mori

UFLA

Prof. Dr. José Reinaldo Moreira da Silva  
UFLA  
(Orientadora)

LAVRAS  
MINAS GERAIS – BRASIL

A Deus Jeová

**OFEREÇO**

À minha família  
À sociedade brasileira

**DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Jeová Deus, pela vida, pela capacidade de raciocínio e pelo cuidado amoroso.

À Universidade Federal de Lavras e ao Programa de Ciência e Tecnologia da Madeira, pela oportunidade de realização deste trabalho.

Aos professores do programa, pelo conhecimento.

Ao professor José Reinaldo, pela dedicação e orientação conferidas ao longo desse tempo. Por contribuir da melhor maneira possível com o trabalho e com quem tanto aprendi.

Aos professores Roberto Braga e Paulo Trugilho ,pela co-orientação, disposição e boa vontade de ensinar.

A Capes, Apiflor e IEF, por disponibilizarem recursos financeiros para a realização da pesquisa.

À empresa Apiflor pelo fornecimento do material para o estudo.

Aos funcionários do Laboratório de Usinagem da Madeira, Hernani e Gilson, pela realização dos ensaios.

Aos professores Fábio Akira e Roberto Braga, que muito enriqueceram este trabalho.

Aos meus amados pais, Rômulo e Silvana, pelo apoio, amor, dedicação e por estarem sempre presentes me acompanhando de perto.

Aos meus irmãos queridos os quais alegam minha vida.

À minha paixão, Henrique, pelos incentivos, companheirismo e amor.

Aos meus avós, tios, primos e demais familiares, por estarem sempre presentes e torcendo por mim. Obrigada pelo carinho, confiança e por todos os momentos alegres proporcionados a mim, pela presença de vocês.

Às congregações de Lavras que me receberam de maneira amorosa e com muita hospitalidade, incluindo Elaine e Thaís, pelo carinho e pelas caronas.

Ao vermelho (golzinho), emprestado por meus avós, por me aliviar nos momentos de aperto e na correria.

Ao colega de mestrado e amigo Pedro que tanto me ajudou. Também à Mariana, Joyce, Murilo, Douglas, alunos de iniciação científica ,pela ajuda.

À minha amiga-irmã Erica, pela companhia na sala de estudos (“salinha”), pelas risadas, desabafos, pela cultura sergipana e principalmente pela amizade.

À Natália, pela amizade sincera e apoio nas horas difíceis, companheira das horas alegres e pela super ajuda na parte final do trabalho.

Às amigas de república Andressa e Eliane o meu obrigada pela agradável convivência que tivemos e por tudo que me ensinaram.

Aos amigos do Laboratório de Ciência e Tecnologia da Madeira pelas risadas, momentos de descontração e ajuda, tornando mais leve as obrigações.

Aos funcionários da Tecnologia da Madeira.

Enfim, a todos que contribuíram e me ajudaram a alcançar mais essa conquista em minha vida!

Meus sinceros agradecimentos

## SUMÁRIO

RESUMO .....	i
ABSTRACT .....	ii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	3
2.1 <i>Toona ciliata</i> M. Roem.....	3
2.2 Qualidade na indústria moveleira .....	5
2.3 Usinagem da madeira e seus parâmetros .....	6
2.3.1 Parâmetros de usinagem .....	6
2.3.1.1 Rotação (n) .....	6
2.3.1.2 Velocidade de corte (Vc).....	7
2.3.1.3 Velocidade de avanço (Vf).....	7
2.3.1.4 Número de dentes (z).....	8
2.3.2 Usinagem da madeira .....	8
2.4 Influência das propriedades da madeira na usinagem .....	11
2.5 Qualidade da superfície usinada .....	13
2.6 Qualidade da superfície e as condições de usinagem .....	15
2.7 Qualificação da superfície usinada .....	17
2.7.1 Qualificação pela Norma ASTM D 1666-87 (ASTM, 1995) .....	19
2.7.2 Qualificação pelo rugosímetro.....	20
2.7.2.1 Parâmetros fornecidos pelo rugosímetro .....	20
2.7.3 Qualificação pelo laser .....	22
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	24
3.1 Avaliação da qualidade da superfície usinada.....	27
3.1.1 Avaliação conforme ASTM.....	27
3.1.2 Rugosímetro .....	28
3.1.3 Sunset laser.....	29
3.1.4 Análise estatística .....	32
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	33
4.1 Qualificação por meio da norma ASTM .....	33
4.2 Qualificação por meio da rugosidade (Ra) .....	41
4.3 Qualificação por meio de imagens de um laser (sunset) .....	43
4.3.1 Avanço por dente de 1,33 mm.....	44
4.3.2 Avanço por dente de 2,82 mm.....	46
4.3.3 Avanço por dente de 6,35 mm.....	49
5 CONCLUSÕES .....	52
6 SUGESTÃO .....	52
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	53
ANEXOS .....	58

## RESUMO

SORAGI, Livia de Carvalho. **Qualidade de superfícies usinadas em madeira de *Toona ciliata* M. Roem.** 2009. 61 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.\*

*Toona ciliata* M. Roem (cedro australiano) está entre as espécies exóticas que são plantadas para produção de madeira serrada. A indústria moveleira carece de metodologias específicas para qualificar a superfície usinada de seus produtos. A definição de padrões de qualidade requer novos equipamentos e metodologias para superfícies de madeiras usinadas. Almeja-se uniformizar a produção, reduzir custos, definir usos e aumentar a competitividade do setor. Os objetivos foram i) avaliar a qualidade da superfície usinada da madeira de *Toona ciliata* M. Roem com diferentes padrões de usinagem e ii) relacionar os percentuais de qualidade por região radial da tora. Utilizou-se madeira de *Toona ciliata* M. Roem aos 18 anos, proveniente do município de Venda Nova do Imigrante/ES. As árvores não possuíam espaçamento definido e foram coletadas ao acaso. Os ensaios de usinagem foram realizados no Laboratório de Usinagem da Madeira (DCF/UFLA). Aplainaram-se os corpos-de-prova com diferentes velocidades de avanço, obtendo avanços por dente de 1,33; 2,82 e 6,35 mm. Posteriormente, realizaram as qualificações das superfícies usinadas de acordo com a ASTM D 1666-87 (American Society for Testing and Materials, ASTM, 1995), o método do rugosímetro e com o laser (He-Ne) com processamento das imagens. A madeira de *Toona ciliata* M. Roem (cedro australiano) apresentou superfícies usinadas de boa qualidade, mostrando-se apta para confecção de produtos sólidos. 63% dos corpos-de-prova com avanço por dente de 1,33 mm foram considerados satisfatórios. A maioria dos corpos-de-prova desse padrão de usinagem foi qualificada como excelente (nota 1) e pertencia a região externa da tora. A maioria dos corpos-de-prova qualificada como ruim (nota 4) eram da região central da tora. 67% dos corpos-de-prova com avanço por dente de 6,35 mm foram considerados não satisfatórios com maiores defeitos de usinagem (notas 4 e 5), independente das regiões radiais. Superfícies qualificadas como excelente (nota 1), boa (nota 2) e regular (nota 3) apresentaram mesma rugosidade. Foi possível qualificar superfícies de madeira usinada com a metodologia do laser e posterior processamento das imagens.

**Palavras-chave:** Processamento mecânico da madeira, qualidade, rugosidade, análise de imagens

---

\*Comitê Orientador: José Reinaldo Moreira da Silva – UFLA (Orientador); Paulo Fernando Trugilho – UFLA; Roberto Alves Braga Júnior – UFLA.

## ABSTRACT

SORAGI, Livia de Carvalho. **Quality of machined surface in wood *Toona ciliata* M. Roem.** 2009. 61 p. Dissertation (Master's degree in Wood Science and Technology) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.\*

*Toona ciliata* M. Roem (Australian cedar) is one of those alien species that is planted for the production of lumber. When used for the furniture industry, it is necessary the development of specific methodologies to characterize the machined surfaces of their products. The constant technological requires that, for the definition of quality standards, new equipment and methodologies for wood surfaces machined be applied. This way, the aim is to standardize the production, reduce costs, define uses and increase the competitiveness of the sector. The objectives of this work were i) evaluate the quality of the machined surface of *Toona ciliata* M. Roem (Australian Cedar) wood with different patterns of machining and ii) to relate the percentage of quality by the radial region of the log. It was used *Toona ciliata* M. Roem 18 years of age from Venda Nova do Imigrante/ES, Brazil. The trees were collected at random. The machining tests were performed at the Laboratory Machining of Wood (DCF/UFLA). The specimens were surfaced with different feed rates, making pitches of 1.33, 2.82 and 6.35 mm. Subsequently it was carried out the qualifications of machined surfaces according to ASTM D 1666-87 (1995), and using the rugosimeter and the laser (He-Ne) with image processing. *Toona ciliata* M. Roem wood had machined surfaces of good quality, being able to manufacture solid products. 63% of the samples with pitch of 1.33 mm were considered satisfactory. Most of the standard of machining specimens were classified as excellent (grade 1) and belonged to the outer region of the log. Most of the specimens classified as bad (grade 4) were from the central region of the log. 67% of the samples with pitch 6.35 mm were considered unsatisfactory with major defects of machining (grades 4 and 5), independent of the radial regions. Areas classified as excellent (grade 1), good (grade 2) and regular (grade 3) had the same roughness. It was possible to characterize surfaces of wood with the methodology of laser and further processing of the images

**Key-words:** Mechanical processing of wood, quality, roughness, image analysis

---

\*Guidance Committee: José Reinaldo Moreira da Silva – UFLA (Major Professor); Paulo Fernando Trugilho – UFLA; Roberto Alves Braga Júnior – UFLA.

## 1 INTRODUÇÃO

Por várias décadas, no Brasil, a única fonte de obtenção de matéria-prima para a produção de móveis era oriunda de florestas nativas. No cenário atual, a madeira gerada em florestas plantadas ganhou espaço para a utilização na fabricação de móveis. Este fato acarreta maior obtenção de matéria-prima a custos reduzidos e contribui para a proteção de matas nativas além de diminuir o déficit florestal. Destaca-se também a importância dos povoamentos florestais para a fixação de carbono. Nesse contexto, o cedro australiano (*Toona ciliata* M. Roem) é uma espécie plantada em diversos estados brasileiros para produção de madeira serrada.

É sabido que, no Brasil, o setor moveleiro a base de madeira encontra-se em franca expansão. Contudo, ele não se apresenta como forte concorrente, no mercado internacional devido à qualidade das superfícies usinadas. Também se observa que é necessário melhorar as condições tecnológicas das indústrias de processamento da madeira e conhecer as interações desse material com o processo. Somente assim será possível não somente aumentar a produtividade, mas também melhorar a qualidade dos produtos.

A avaliação da qualidade da superfície dos produtos de madeiras geralmente é feita manualmente, ou seja, pela avaliação do grau de “aspereza”. Neste caso, utiliza-se a sensibilidade ao tato ou exames visuais com base na experiência do chefe de sessão. Esse tipo de avaliação apresenta caráter subjetivo e de difícil repetitividade.

Novos equipamentos e metodologias para qualificar a superfície usinada são necessários. A partir disto, será possível desenvolver padrões de qualidade para uniformizar a produção, reduzir custos, definir usos e aumentar a competitividade do setor.

Frente ao perfil acima exposto, os objetivos desse trabalho foram:

- i) avaliar a qualidade da superfície usinada da madeira de *Toona ciliata* M. Roem com diferentes padrões de usinagem;
- ii) relacionar os percentuais de qualidade por região radial da tora

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 *Toona ciliata* M. Roem

O Cedro Australiano *Toona ciliata* M. Roem é uma espécie exótica, proveniente da Austrália, pertencente à família *Meliceae*. Apresenta bom crescimento em regiões de 500 a 1.500 m de altitude e com regime pluviométrico de 800 a 1.800 mm/ano, com 2 a 6 meses de estiagem. A espécie sobrevive às temperaturas mínimas absolutas pouco abaixo de 0°C. Tolera geada leve de curta duração. Não suporta solos argilosos compactados e nem solos arenosos pobres. Também não suporta solos mal drenados, que acarretam morte por encharcamento das raízes (Forest Brazil, 2008).

Originário das regiões tropicais da Austrália adaptou-se muito bem no Brasil, onde encontrou condições edafoclimáticas favoráveis para o seu desenvolvimento vegetativo e para a produção de madeira. Apresenta grande potencial para silvicultura comercial (Ares & Fownes, 2000). A implantação da cultura é economicamente viável e confere um investimento rentável ao produtor, segundo análise econômica de Pinheiro et al. (2003).

No Brasil, essa espécie *Toona ciliata* M. Roem tem-se desenvolvido muito bem em solos mais planos e em solos com declividade acentuada. Possui abundante regeneração natural, mesmo onde foi introduzida como uma espécie exótica. Devido a estas características é considerada uma espécie pantropical, ou seja, cultivada em todos os trópicos (Forest Brazil, 2008).

Outra característica da espécie é a resistência ao ataque da *Hypsiphyla grandella* (broca da gema apical) que ataca as espécies de cedro brasileiras *Cedrella odorata* e *Cedrella fissilis* e o mogno, *Swietenia macrophylla*. A espécie é susceptível à *Hypsiphyla robusta*, que causa danos semelhantes ao do

ataque de *H. grandella*, porém não há relatos de ocorrência de *H. robusta* no Brasil (Cunningham et al., 2005).

A idade “ideal” de corte do cedro é aos 15 anos, podendo ser antecipada ou adiada, dependendo das condições específicas do povoamento ou da necessidade do produtor. (Forest Brazil, 2008).

O cedro australiano possui madeira similar à madeira do cedro (*Cedrela odorata* e *Cedrela fissilis*), tendo as mesmas qualidades e sendo utilizadas para os mesmos fins. Atualmente sua madeira vem sendo empregada na fabricação de móveis finos, na produção de compensados, laminados, ornamentos de interior, marcenaria, instrumentos musicais, caixas, engradados, portas e janelas entre outros. Relata-se também a extração de taninos e de substâncias de uso na produção de inseticidas, essência para a indústria de perfumaria e cosméticos e medicamentos (World Agroforestry Centre, 2008). Apresenta coloração avermelhada brilhante, com bonitas figuras, possui baixa torção de fibras e apresenta moderada resistência a cupins com durabilidade mediana. Sua densidade varia entre 0,460 a 0,640 g/cm<sup>3</sup> (Forest Brazil, 2008).

Quanto ao crescimento, apresenta árvores de grande porte, podendo alcançar até 50m de altura e 2,0 m de diâmetro. De acordo com o boletim informativo do grupo Forest Brazil (2008), em Minas Gerais, plantios bem manejados chegam a atingir em 12 anos um diâmetro de 0,40 e 20 metros de fuste. Em plantios comerciais no Brasil, estima-se um Incremento Médio Anual (IMA) de 20 a 30 m<sup>3</sup>/ha/ano.

O plantio e manejo do cedro australiano são realizados de forma semelhante ao plantio de Eucalipto. O número de árvores pode variar de 1111 a 1666 plantas por hectare. O cedro australiano não se desenvolve satisfatoriamente em solos pobres, sendo necessárias 1 adubação de plantio e 2 a 3 adubações de cobertura.

Na Austrália, esta árvore é conhecida como “Ouro Vermelho”, devido à nobreza de sua madeira. Sempre foi o primeiro gigante a ser derrubado na floresta, tendo em vista a riqueza que sua madeira poderia proporcionar (Forest Brazil, 2008).

Por esses motivos, o cultivo da espécie tem se expandido no país, com a finalidade de produção de madeira nobre para serraria e indústria moveleira. Os plantios estão concentrados nos estados da região sudeste, com destaque para os Estados do Espírito Santo e Minas Gerais.

O crescimento da exploração comercial da cultura, comentado por Castro-Gamboa (2000) e também por Hasse (2005), determina a importância do conhecimento e estudos sobre a espécie, com geração de novas técnicas que possibilitem avanços tecnológicos para produção e propagação da mesma.

De acordo com Brandão (2005), citado por Souza (2007), o único registro da introdução da espécie no país é da antiga empresa Aracruz Celulose (ES), em 1973. Nesse ano, vários lotes de sementes de diferentes espécies foram importados do Timor Leste e Austrália e introduzidos no Brasil. A empresa efetuou pequenos plantios formando assim um banco de germoplasma, que para o caso do cedro australiano originou as populações implantadas no país. Em 1989, a citada empresa começou a distribuir mudas dessa espécie para agricultores, escolas de ciências agrárias e demais setores interessados, iniciando assim, a multiplicação dos plantios (Hasse, 2005).

## **2.2 Qualidade na indústria moveleira**

A busca por melhor qualidade é uma constante em diversos setores, inclusive no setor industrial madeireiro.

No que diz respeito aos produtos e serviços vendidos no mercado, há várias definições para qualidade: “conformidade com as exigências dos clientes”, “relação custo/benefício”, “adequação ao uso”, “valor agregado, que

produtos similares não possuem”, “fazer certo à primeira vez”, “produtos e, ou serviços com efetividade”. Enfim, o termo é geralmente empregado para significar “excelência” de um produto ou serviço (Wikipédia, 2009).

É reconhecido que os custos acarretados pela padronização de medidas e qualidade da madeira serrada são amplamente recompensados por uma série de vantagens de caráter industrial e comercial. Este fato beneficia tanto os produtores como os consumidores (Zenid, 1989).

Avaliando a conversão de madeira em móveis pode-se observar que ainda há muito que melhorar na produção. É importante criar subsídios para melhorar o aproveitamento de madeira para que o processo produtivo na indústria moveleira seja otimizado.

Segundo Bonduelle (2002) existem indústrias madeireiras que efetuam usinagem considerada de boa qualidade. Contudo, elas lixam todos os produtos após a usinagem. Além de utilizar, às vezes, mais que o dobro do tempo de usinagem, essa operação de lixamento é desnecessária, sem falar da destruição parcial da precisão dimensional.

### **2.3 Usinagem da madeira e seus parâmetros**

Usinagem da madeira é o processamento da madeira por meio de uma ferramenta de corte, visando qualidade do produto e segurança do operador (Silva et al., 2005).

#### **2.3.1 Parâmetros de usinagem**

##### **2.3.1.1 Rotação (n)**

A rotação é o número de ciclos que o eixo da máquina realiza durante um determinado tempo. É conhecida pela sigla RPM, número de rotações por minuto. A melhoria da qualidade da superfície usinada de uma peça pode ser

alcançada com o aumento da rotação do eixo. Segundo Bonduelle (2001), se a rotação for aumentada demasiadamente, poderá provocar o escurecimento da superfície usinada, além do desgaste prematuro do gume de corte da ferramenta, diminuindo sua vida útil.

### 2.3.1.2 Velocidade de corte ( $V_c$ )

É a relação entre o caminho percorrido por um dente em determinado intervalo de tempo. É dada em metros por segundo e pode ser determinada pela Equação 1.

$$V_c = \frac{\pi * D * n}{60.000} \quad (1)$$

Em que:

$V_c$  = velocidade de corte, em  $m*s^{-1}$ ;

$D$  = diâmetro da ferramenta, em mm;

$n$  = rotação do eixo porta ferramenta, em  $min^{-1}$ .

### 2.3.1.3 Velocidade de avanço ( $V_f$ )

Representa o deslocamento da peça de madeira em direção à ferramenta de corte durante um intervalo de tempo. É dada em metros por minuto e pode ser obtida pela Equação 2.

$$V_f = \frac{Du}{t} \quad (2)$$

Em que:

$V_f$  = velocidade de avanço da peça, em  $m*min.^{-1}$ ;

$Du$  = deslocamento de usinagem, em mm;

$t$  = tempo necessário para executar o deslocamento de usinagem (min.).

#### **2.3.1.4 Número de dentes (z)**

É a quantidade de dentes presentes na ferramenta de corte.

Segundo Lopes (2003) o número de dentes influencia a qualidade de superfície usinada sob dois aspectos:

- Menor pré-clivagem em maior número de dentes. Este fato é ligado à qualidade da superfície obtida após a usinagem.
- Menor avanço por dente quanto maior o número dos mesmos. Este fato também está ligado à qualidade da superfície obtida após a usinagem.

#### **2.3.2 Usinagem da madeira**

Segundo Bonduelle et al. (2002), a usinagem é denominada uma Função 5M. Então, temos a matéria-prima, máquina, metodologia, mão-de-obra e meio ambiente. Na metodologia encontra-se a escolha das ferramentas, as definições de velocidades de avanço, rotação e quantidade de material a ser desbastado por passada. Todos os elementos citados irão interferir na qualidade da superfície usinada de madeira, pois definem os parâmetros de corte. Portanto essas escolhas devem ser as mais adequadas possíveis para otimizar o processamento, pois é sabido que usinar a madeira não é somente cortá-la, mas produzir peças de forma e qualidade desejadas, economicamente possível.

A madeira é anisotrópica, podendo então ser usinada de diferentes maneiras, em função da direção e sentido de ataque entre a ferramenta e as fibras da madeira. Leitz (2001) define que se pode trabalhar a madeira longitudinalmente, transversalmente e no topo tendo cada um suas peculiaridades.

Alguns cuidados como a escolha e o uso correto das ferramentas de corte devem ser considerados com muito mais atenção, pois podem representar um ganho no custo final. Ferramentas pouco adaptadas ou com condições de

corte não otimizadas, podem elevar os custos por meio das manutenções e, ou as afiações. Ou seja, a vida útil das ferramentas e o tempo de máquina parada, para substituição das mesmas, em cada afiação ou troca de pastilhas, definem a perda ou o ganho financeiro em usinagem (Bonduelle, 2002).

A escolha da ferramenta deverá ser feita em função do tipo de madeira a ser usinada, do material de confecção da ferramenta e da magnitude de seus ângulos, visto que, o conhecimento dos ângulos básicos das ferramentas de corte fornece subsídios para prever a qualidade da superfície usinada (Bonduelle, 2001).

Com a usinagem, ocorre o desgaste da aresta cortante da ferramenta. Para não alterar a qualidade é preciso estar atento à hora de parar a usinagem. O desgaste do gume se efetua em três etapas bem distintas para qualquer material de corte utilizado. Na última etapa o desgaste aumenta de maneira exponencial com a distância de usinagem executada, por causa dos fenômenos combinados de fadiga, abrasão, erosão e, eventualmente, de corrosão. Para manter uma qualidade da superfície desejada é imperativo parar a usinagem antes de alcançar a última etapa (Bonduelle, 2002).

A fixação do ponto representativo do fim de vida de uma ferramenta é fundamental no estudo da usinabilidade. São utilizados na prática, diversos critérios para determinar este ponto, dependendo a escolha, em grande parte, das exigências da usinagem (precisão e grau de acabamento) e do material da ferramenta (Lucas Filho, 2004).

Na prática fabril, existem métodos de especificação da vida de uma ferramenta de corte entre duas afiações sucessivas. Para isso são utilizados os tempos de máquina, tempo efetivos de corte, volume de material removido e número de peças usinadas (Lucas Filho, 2004).

Segundo Bonduelle (2001) o único critério para o cliente final é a qualidade das superfícies das peças usinadas. Na indústria madeireira, a

substituição da ferramenta de corte (fresa, broca, serra circular) ocorre quando a mesma já não consegue apresentar a qualidade mínima determinada, em geral de maneira subjetiva, pela indústria. Quanto maior o tempo de utilização de uma ferramenta sem afiar, melhor, pois menor será o número de afiações e, portanto, maior será a sua vida. Entretanto, existe um limite, pois uma ferramenta com um desgaste excessivo irá requerer uma maior perda do material de corte na afiação. O critério usado nas indústrias brasileiras para determinar a troca da ferramenta de corte geralmente é a quantidade em metros lineares de madeira usinada ou, ainda pior, o número de horas de usinagem.

Quando se trabalha com qualificação de superfícies usinadas em madeiras e, ou derivados, deve-se ter o cuidado para evitar a interferência do desgaste das ferramentas utilizadas no processo de usinagem. Neste sentido, Bonduelle (1994) afirma que nos primeiros metros de usinagem com uma ferramenta nova ou recém-afiada observa-se a formação de qualidade com característica bastante peculiar, apresentando ótimo desempenho. A qualificação deste intervalo de usinagem deve ser evitada, pois não representa o padrão médio real da ferramenta. A partir deste ponto, ocorre uma estabilização da qualidade até que o desgaste seja intensificado e posterior queda na qualidade. Neste ponto, é indicada a troca ou novas afiações das ferramentas.

Bonduelle (1994) afirmou que os valores obtidos para as qualidades de superfícies usinadas podem predizer o momento certo de troca da ferramenta, isto é, a vistoria da qualidade poderá ser executada simultaneamente com o processo de usinagem, na linha de produção e a partir de um valor de defeito encontrado, indicaria a necessidade de troca da ferramenta. Esse valor evitaria a substituição de ferramentas em função da distância usinada, representada pelo volume de peças processadas, ou por tempo de trabalho da ferramenta, geralmente determinado pelos turnos de trabalho.

Segundo Néri & Gonçalves (2002) a qualidade da superfície usinada em madeiras esta associada ao tipo de formação do cavaco, que por sua vez está diretamente relacionada ao ângulo de saída da ferramenta, à espessura de corte e ao valor e direção da força normal. Estes fatores devem ser cuidadosamente estudados e suas relações estabelecidas para cada situação. Esses dados fornecem subsídios para as indústrias de máquinas destinadas ao processamento da madeira.

Na usinagem e no acabamento de madeiras de *Toona ciliata*, faltam conhecimentos sobre a influência que os parâmetros de usinagem e as variáveis do processo têm sobre o resultado final de trabalho.

#### **2.4 Influência das propriedades da madeira na usinagem**

A qualidade final de um produto relaciona-se com as operações de usinagem e com a estrutura física e anatômica da madeira (Silva et al., 1999). Relacionado à estrutura microscópica da madeira, em qualquer operação de usinagem as fibras da madeira são arrancadas e, raramente, cortadas. Este efeito pode ser explicado pela grande dimensão dos gumes de corte das ferramentas em relação às dimensões das fibras. As fibras apresentam dimensões, geralmente, menores que os raios dos gumes das ferramentas utilizadas na usinagem, principalmente quando são utilizados materiais que não permitem a confecção de gumes muito “vivos”. Neste caso as fibras da madeira são raspadas ou arrancadas e não cortadas.

Os principais defeitos nos processos de fresamento do corte e da furação, estão ligados às variações nas propriedades da madeira, as condições das máquinas e das ferramentas de corte e ao treinamento do operador da máquina. Em geral a presença de sílica (cristais de óxido de silício) confere certa resistência à madeira, mas possui efeito negativo quanto ao desgaste das ferramentas de corte. Em madeiras com grã irregular a superfície fica áspera nas

regiões em que a ferramenta corta em sentido contrário à direção normal dos tecidos. Substâncias especiais, presentes em certas espécies, tais como canais celulares, resinas e células oleíferas, dificulta as operações de desdobro e de beneficiamento por processos de fresamento, corte e furação quando são danosas à saúde ou aderem às ferramentas (Lucas Filho, 2004).

Em razão da sua estrutura, as propriedades mecânicas e físicas da madeira variam de acordo com a direção considerada (anisotropia). Portanto, o corte na madeira não pode ser abordado sem a consideração do seu comportamento anisotrópico. Por isso, foi sugerida por especialistas em usinagem da madeira a adoção de uma convenção definindo as principais direções de corte. Kivimaa (2002) citado por Lucas Filho (2004) determinou uma considerável influência do sentido de corte sobre as forças de usinagem. Inicialmente, definiu o corte ortogonal como sendo a situação em que o gume da ferramenta é perpendicular à direção do movimento de avanço da peça. McKenzie (1964) propôs, também, uma notação com dois números para descrever situações diferentes de corte que podem ocorrer durante o corte ortogonal da madeira. O primeiro representa o ângulo entre o gume da ferramenta e a fibra da madeira. O segundo indica o ângulo entre a direção de corte e a fibra da madeira. Esta notação define as três principais direções de corte, chamados 90-0, 90-90, e 0-90. A situação 90-0 (direção longitudinal ou axial) é encontrada em ações de corte como no processo de fresamento, em aplainamento ou desengrosso e trabalhos de corte de molduras na direção paralela às fibras.

Outra relação entre a anatomia da madeira e a qualidade da usinagem é a massa específica. Esta é a propriedade física mais representativa da qualidade da madeira. Para representar as forças de corte envolvidas na usinagem da madeira não é diferente. Contudo, em vista das grandes variações nas propriedades físicas entre as espécies, existem fatores que influenciam. Entre os fatores que

causam essas diferenças encontram-se, a presença de sílica ou outros depósitos de minerais abrasivos nas células, o teor de resina, a porosidade, as dimensões das fibras, a orientação da grã e a presença de nós, os quais, segundo diversos autores como Koch (1964), Kollmann & Côté (1984), Panshin & De Zeeuw (1980), Lucas Filho (1997) e Silva (2002), tem grande influência na qualidade da superfície e na eficiência dos processos de transformação da madeira.

A influência da umidade da madeira é outra relação importante. Segundo Kollmann & Côté (1984) geralmente as forças de corte para o corte ortogonal na direção 90- 0 permanecem aproximadamente constante na madeira seca até 8% de umidade, e então cai para aproximadamente  $\frac{1}{4}$  ou metade desse valor quando a umidade na madeira se aproxima do ponto de saturação das fibras.

Koch (1964), citado por Lucas Filho (2004), apresenta alguns resultados da influência da umidade, considerando determinados ângulos de saída, espessura de cavaco e espécies de madeira. Neles, basicamente, as forças de corte diminuem quando a umidade é aumentada, ou seja, uma relação inversamente proporcional. Esse efeito pode ser justificado pela adsorção de água na parede celular, aumentando os espaços intermicelares e reduzindo a resistência mecânica da madeira quando é aumentando a umidade (Lucas Filho, 1997). De modo inverso, quando a madeira é seca a umidade abaixo do ponto de saturação das fibras (PSF), há uma redução dos espaços submicroscópicos entre as microfibrilas formadoras da parede celular, aumentando a rigidez da mesma e com isso, aumentando a resistência mecânica de modo exponencial.

## **2.5 Qualidade da superfície usinada**

Tratando-se de madeiras usinadas, a superfície é o elemento de definição da qualidade.

Inspetores de qualidade devem compreender bem todas as especificações presentes num projeto. Além disso, é preciso reconhecer que condições como tipo de máquina utilizada, desgaste da ferramenta, vibrações indesejadas, parâmetros de usinagem empregados e até mesmo o operador da máquina refletem de alguma maneira na geometria da superfície. Todo esse conjunto de informações fornece uma ferramenta muito útil para o controle de qualidade do processo de fabricação (Bet, 1999).

Adaptando Silva et al. (1996), pode-se afirmar que os principais defeitos no processo de usinagem da madeira estão ligados a quatro fontes, sendo:

- Variações das propriedades da madeira em seus diferentes planos de corte.
- Condições das máquinas – relacionada diretamente ao desgaste dos componentes das máquinas que alteram o seu funcionamento. Os principais aspectos a serem considerados são a manutenção, o balanceamento e o alinhamento do eixo porta ferramentas. Outro fator marcante é a lubrificação, que deverá ser desenvolvido por um técnico treinado, uma vez que tanto o uso correto como a escolha do lubrificante são de fundamental importância para a eficiência do processo.
- Ferramentas de corte – relacionada ao estado de conservação do gume de corte e a escolha da ferramenta mais adequada. Esses afetam diretamente a qualidade da usinagem. Devem-se ter gumes os mais estreitos possíveis e reafiá-los quando estes atingirem 0,8 mm de espessura ou estiverem quebrado (Silva et al., 1996). De acordo com Santos (1999), quando a ferramenta de corte não está bem afiada ou ainda quando está desgastada, o ângulo de ataque pode tornar-se negativo. Neste caso, produz-se afunilamento na superfície de corte que ocasiona o aparecimento de forças elevadas de atrito. Assim, as forças de corte tornam-se também maiores. Quanto maior a espessura de corte, maiores serão as forças que se desenvolvem durante o corte. Outro

fator importante que deve ser observado é a presença dos ângulos dos dentes, uma vez que se precisa mantê-los durante o processo de afiação para que se possa ter alta qualidade de usinagem.

- Treinamento do operador – a regulagem e o ajuste correto das máquinas é função do grau de conhecimento do operador sobre todas as regulagens existentes que afetam diretamente a qualidade da superfície usinada, bem como detectar o mau funcionamento das mesmas, que causará diferentes situações de usinagem e conseqüentemente qualidades inferiores (Silva et al., 1996).

Com a redução da velocidade de avanço da madeira e/ou o aumento do número de gumes ativos de corte e da freqüência de rotação do eixo porta-ferramenta da máquina, pode-se alcançar a melhoria da qualidade do acabamento. Contudo, o aumento demasiado do número de gumes ativos leva a um ponto onde os gumes giram mais rápido que o tempo de levantamento dos cavacos. Este fenômeno é denominado de raspagem que provoca o escurecimento da superfície usinada e desgaste prematuro do gume de corte da ferramenta, diminuindo a sua vida útil. Neste sentido, Bonduelle (2001) afirma que esta prática apenas é válida quando se dispõe de tecnologia hidrocentrante ou de modo geral através da fixação hidráulica. Para as operações de aplainamento ou fresagem, os valores de avanço por dente devem estar no intervalo de 1,0 a 1,8 mm, segundo o mesmo autor.

## **2.6 Qualidade da superfície e as condições de usinagem**

Estudos da rugosidade da superfície como propriedade dos materiais iniciou antes de 1939 e estes foram aplicados inicialmente a indústria metal mecânica, enquanto os estudos sobre a rugosidade da madeira seguiram-se após 1950. Hann (1957), citado por Lucas Filho (2004), citou a necessidade de um controle de qualidade para indicar a rugosidade de superfícies de madeiras

usinadas e que mostrasse conformidade aos padrões prescritos, assim como nos metais.

É de conhecimento que a mensuração da qualidade da superfície usinada em madeira e derivados requer análise mais minuciosa que aquela feita para metais. Os vasos, os lumes das fibras e outras células, falhas na estrutura, trincas de compressão apresentam-se como elementos complicadores nesta análise e requerem medições de precisão ( $\mu\text{m}$ ) com grandes amplitudes na escala.

A evolução da usinagem de metais não foi igual àquela ocorrida com a madeira. Os padrões foram definidos para materiais homogêneos e não são totalmente aplicáveis à madeira. Funck et al. (1992) e Krisch & Csiha (1999) citados por Lucas Filho (2004) afirmaram que os parâmetros não foram desenvolvidos para avaliar a qualidade das superfícies de madeira usinada. Entre as pesquisas dedicadas a avaliação da qualidade das superfícies de madeiras usinadas, Lucas Filho (2004), cita as de Peters & Cumming (1970), Bonac (1975, 1979), Marchal (1983), Lavery et al. (1995), Lundberg & Porankiewicz (1995), Hiziroglu (1996), Lemaster (1982, 1996, 1997, 1999), Krisch & Csiha (1999) Fujiwara et al. (1999), Magross & Sitkei (1999) e Gurau et al. (2001).

Gurau et al. (2001), citados por Lucas Filho (2004) desenvolveu um método que quantifica a “topografia” de uma área com o intuito de avaliar a qualidade da superfície da peça de madeira usinada. Esse método inclui um modelo analítico de processamento de dados tal que as diferenças devido ao processo pudessem ser diferenciadas daquelas referentes à anatomia da madeira. Foi possível estabelecer correlações entre as variáveis de processo (velocidade de avanço, espécies de madeira, vida da ferramenta e direção de corte) e os valores de rugosidade devido ao processo de usinagem. A compreensão destas variáveis de processo permitiu a otimização das operações de usinagem. Para determinar os parâmetros de rugosidade foi utilizada a varredura por apalpador de contato e a triangulação por *laser*, sem contato. A leitura com apalpador

revelou marcas regulares de usinagem e forneceu informações mais detalhadas sobre a topografia da madeira. Contudo, o tempo para efetuar as leituras foi maior que aquele apresentado pelo laser.

## **2.7 Qualificação da superfície usinada**

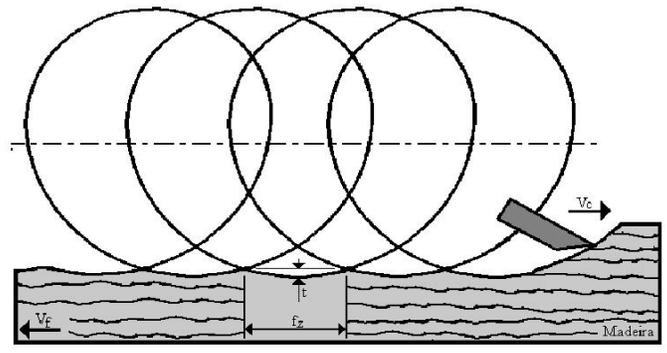
Kninmonth & Whitehouse (1991) afirmaram que a qualidade obtida não é um aspecto pontual e sim uma relação ampla de todas as propriedades do material trabalhado. Contudo, é importante verificar a variação dessas propriedades por meio das medições no âmbito macro e microscópico.

No processamento da madeira, a estrutura da superfície é considerada importante componente na qualidade, cuja função é principalmente estética. Ela está relacionada às formas especificadas nos projetos dos móveis e a obtenção de superfícies lisas, sem ondulações ou defeitos, tais como manchas, causados pelo atrito ferramenta-superfície. Superfícies de boa qualidade permitem adesão de tintas e de vernizes utilizados em acabamentos superficiais (Lucas Filho, 2004).

A qualidade da usinagem de madeiras é apresentada diferentemente por dois grupos de pesquisadores. O primeiro grupo conceitua a qualidade apenas por meio dos valores normativos da usinagem, com base no cálculo do avanço por dente ( $f_z$ ) ou da profundidade do arco ciclóide ( $t$ ), observados na Figura 1. O segundo grupo considera não somente esses parâmetros, como também a presença de falhas na superfície, que são geradas pela estrutura da madeira, em função dos diferentes tipos, dimensões e orientações das células. A diferença entre os dois grupos está relacionada às características do material a ser usinado (Silva, 2002).

É de conhecimento que processamentos mecânicos da madeira com movimentos circulares associados a movimentos lineares não produzem uma superfície plana. Nestes processamentos é produzida uma série de pequenas depressões denominadas avanço por dente (Figura 1). O passo do avanço por

dente é resultado da interação entre velocidade de avanço, número de dentes e rotação da ferramenta de corte. Quanto menor o valor do avanço por dente, melhor será a qualidade do acabamento.



Fonte: Adaptação de Weissenstein (2000) citado por Silva (2002).

FIGURA 1 Valores normativos de aplainamento, em que  $f_z$  = avanço por dente,  $t$  = profundidade do arco ciclóide,  $V_c$  = velocidade de corte e  $V_f$  = velocidade de avanço.

Devido à estrutura complexa da madeira, a maioria das pesquisas para definir a qualidade de superfícies usinadas em madeira apresentou dificuldades na obtenção dos resultados (Silva, 2002). Assim, as metodologias mais usadas para qualificar a superfície são a comparação com padrões estabelecidos pela ASTM D 1666-87 (ASTM, 1995) e a determinação do avanço por dente (Equação 3).

$$fz_{calculado} = \frac{Vf}{n * z} \quad (3)$$

Em que:

$fz_{calculado}$  = avanço por dente, em mm;

$V_f$  = velocidade de avanço da peça, em m/min;

$n$  = rotação do eixo porta ferramenta, em  $\text{min}^{-1}$ ;

$z$  = número de gumes ativos da ferramenta (adimensional);

No ambiente fabril, o controle da qualidade da superfície de madeira é baseado na avaliação visual e, ou por meio da sensibilidade ao tato.

### 2.7.1 Qualificação pela Norma ASTM D 1666-87 (ASTM, 1995)

A qualificação de superfícies usinadas em madeira utilizando a norma ASTM D 1666-87 (ASTM, 1995) apresenta resultados satisfatórios desde que sejam definidos e discutidos os parâmetros de avaliação entre os vários avaliadores. Contudo, a repetitividade das medições torna-se o fator limitante.

Na medida direta segundo a norma ASTM D 1666-87 (ASTM, 1995) são definidos alguns defeitos como arrancamento de fibras, lasqueamento e falhas de usinagem. Posteriormente, são atribuídas notas para qualificar a superfície. É importante salientar que a nota zero corresponde à melhor qualidade, sendo a superfície isenta de defeito e a nota quatro para a superfície com maior grau de defeitos.

TABELA 1 Classes de qualidade da superfície de madeiras usinadas

Nota	Classificação da superfície aplainada
0	Excelente (isento de defeitos)
1	Boa
2	Regular
3	Ruim
4	Muito ruim

Fonte: ASTM D 1666-87 (ASTM, 1995).

Após as operações de usinagem, é executada sua qualificação para posterior determinação do uso. Contudo, o empirismo das classes de qualidade na indicação de usos nem sempre é correto e, ou otimizado. Neste sentido, Silva (2002) sugeriu que fossem utilizados métodos ópticos e mecânicos mais adequados à superfície da madeira.

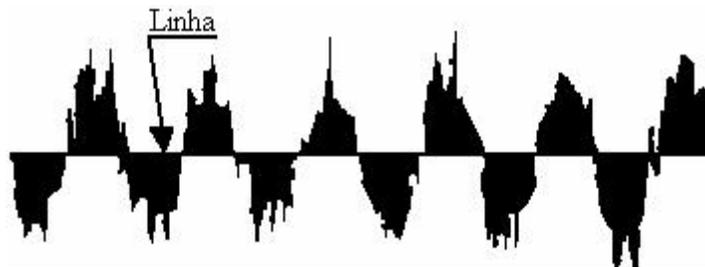
### **2.7.2 Qualificação pelo rugosímetro**

É sabido que os rugosímetros são equipamentos que determinam perfis lineares em superfícies de materiais. Eles medem variações verticais em função de um deslocamento horizontal e é usado para verificar rugosidade em materiais como metais, plásticos, superfícies de dentes entre outros. Resultados obtidos por Silva et al. (2006) mostraram que o rugosímetro de arraste pode ser utilizado para verificação de texturas de superfícies usinadas de madeira.

#### **2.7.2.1 Parâmetros fornecidos pelo rugosímetro**

Os parâmetros de rugosidades representam uma forma da expressão matemática entre a variação vertical das superfícies, expresso pelos picos e vales e o deslocamento horizontal do sensor (agulha). Os parâmetros normalmente utilizados nas avaliações de rugosidade são: Ra, Rq, Rt, Ry, Rz e Sm. Silva et al. (2008), analisando madeiras de *Eucalyptus grandis* concluíram que, inicialmente os parâmetros de rugosidade Ra e Rq apresentaram uma correlação com a velocidade de avanço, pois os valores médios dos parâmetros Ra e Rq tendem a aumentar à medida que a velocidade de avanço aumenta.

O parâmetro de rugosidade Ra baseia-se na medição da textura de uma superfície por meio do recurso da linha (Figura 2). É sabido que quanto menor o valor desse parâmetro menor é a rugosidade do material.



Fonte: Taylor Hobson (2008).

FIGURA 2 Recurso da linha para determinação do parâmetro Ra da rugosidade em superfície.

O parâmetro Ra é exatamente a altura de um retângulo cuja área é igual à soma absoluta das áreas delimitadas entre o perfil de rugosidade e a linha média, tendo por comprimento o percurso de medição (Equação 5).

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (5)$$

Segundo Bet (1999), para metais, a avaliação do acabamento da superfície usinada é usualmente levada em conta no monitoramento das condições de usinagem nos processos de fabricação. Entender as relações entre a qualidade da superfície e as condições de corte é uma forma de análise com vistas à melhoria do processo de usinagem. Bet (1999) estudou a medição da textura de superfícies metálicas utilizando rugosímetros com sondas baseadas no apalpamento mecânico e sondas baseadas no apalpamento óptico. Foram apontados os problemas relativos à quantificação da textura de superfícies usinadas e o entendimento de certos comportamentos dos processos de usinagem em relação à qualidade das superfícies usinadas. Essa metodologia pode ter grande potencial para avaliação da qualidade da superfície da madeira usinada

em indústrias de móveis, se feitos ajustes para sua aplicação neste segmento industrial. Bet (1999) na usinagem de metais e Farias (2000) na usinagem de madeiras utilizaram para essa quantificação parâmetros como a profundidade média de rugosidade (Rz), que representa os desvios medidos nos perfis da superfície.

Pesquisas têm sido realizadas a fim de buscar alternativas sem que haja contato entre o elemento medidor e a superfície do objeto. Esses métodos devem possuir rapidez e eficiência. Dentre várias alternativas, as técnicas ópticas de medição de perfis têm se mostrado eficientes e eficazes para materiais biológicos ou heterogêneos, como a madeira. Estas técnicas são aplicadas em estudos com materiais estáticos e mais recentemente impostos à situação dinâmica. As técnicas mais utilizadas são a holografia, a fotoelasticidade clássica, a interferometria *speckle* e as técnicas de *moiré*. Derivações destas técnicas podem utilizar as características de coerência e alta direcionalidade da luz laser para obter informações por meio do padrão de *speckle* como sugerido por Silva et al. (2005), bem como por efeitos de sombra na superfície.

### **2.7.3 Qualificação pelo laser**

Na busca por metodologias não destrutivas para as análises de materiais, em especial, de materiais biológicos, o uso de técnicas ópticas ganha espaço a cada dia como apresentado por Paliwal et al. (2003), Hernández-Sa'nchez et al. (2006), Park & Chen (1996) e Blasco et al. (2003) citados por Faria et al., (2008), e fazendo uso das mais diversas ferramentas de iluminação e captura de imagens, entre elas utilizando o laser como fonte de luz.

O laser (*Light Amplification by the Stimulated Emission Radiation*) é um tipo de luz que permite o uso de características importantes, como o caso de sua quase-monocromaticidade e de sua coerência, além da capacidade de ser uma luz concentrada e altamente direcionável (Hecht, 2001).

Uma aplicação que associou o laser com técnicas ópticas e análise de imagens foi apresentada em distintas versões por Hu et al. (2004), Simonaho et al. (2004) e Faria et al. (2008), para a medição da orientação das fibras, grã da madeira de forma não-destrutiva e com potencial de ser automatizada.

Silva et al. (2006) avaliaram a técnica de captura das imagens de superfícies de madeira de *Eucalyptus* sp por meio de iluminação com laser de baixa potência aplicada em diferentes ângulos. As imagens foram processadas tomando como base os padrões de interferência formados na superfície do material, usando as sombras formadas pela iluminação da madeira. Os resultados de distintos ângulos foram comparados e uma análise espectral foi conduzida para caracterizar as frequências em cada perfil. Os autores concluíram que a iluminação aproximadamente paralela entre a madeira e o laser foi a que apresentou imagens mais bem definidas, possibilitando a visualização das cristas e relacioná-las aos distintos fz. Desta forma, a potencialidade da técnica ficou comprovada como viável, necessitando de desenvolvimentos para seu aprimoramento e robustez, bem como tratamento das imagens para sua mensuração. Neste caso, o melhor resultado foi explicado como sendo possível por causa das sombras produzidas pela iluminação paralela a superfície da madeira. Neste caso, as irregularidades periódicas da superfície iluminada resultam em padrões de sombras que foram tratadas por técnicas de processamento e análise de imagens e de forma numérica comparadas com os parâmetros desejados.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Utilizou-se madeira de *Toona ciliata* M. Roem (cedro australiano), proveniente do município de Venda Nova do Imigrante/ES da Fazenda São Domingos, com diâmetro médio, a 1,30 m do solo ( $D_{1,30m}$ ), de 310 mm. O plantio não possuía espaçamento definido, sem adubação, tinha 18 anos na época do abate e foram coletadas ao acaso.

Após a coleta as toras, de no mínimo 250 mm, foram transportadas para a Unidade Experimental de Desdobro e Secagem da Madeira (DCF-UFLA), onde foram desdobradas, por meio de cortes simultâneos paralelos à casca. Durante esse processo, as tábuas obtidas foram classificadas segundo sua posição nas toras em centrais, intermediárias e externas. A seguir procedeu-se a secagem em estufa convencional, até 12% (base seca), conforme programa de secagem sugerido por *software* elaborado por Verril & Simpson (2009). Após a secagem, selecionou-se 150 tábuas, por região que foram seccionadas com a dimensão de 1050 mm de comprimento. As tábuas foram transportadas para o Laboratório de Usinagem da Madeira (DCF/UFLA), onde se preparou os corpos-de-prova. Todas as tábuas foram desempenadas e desengrossadas, nas faces e nos cantos, obtendo-se 150 corpos-de-prova de 1050 x 200 x 25 mm (C x L x E).

Os ensaios foram desenvolvidos em uma plaina desempenadeira com rotações de 2000 a 4635  $\text{min}^{-1}$ , com um cabeçote de 100 mm de diâmetro contendo três facas. A velocidade de avanço foi controlada por um inversor de frequência ligado a um alimentador de avanço com velocidade de 15  $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$  a 33  $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$  (Figuras 3 e 4).

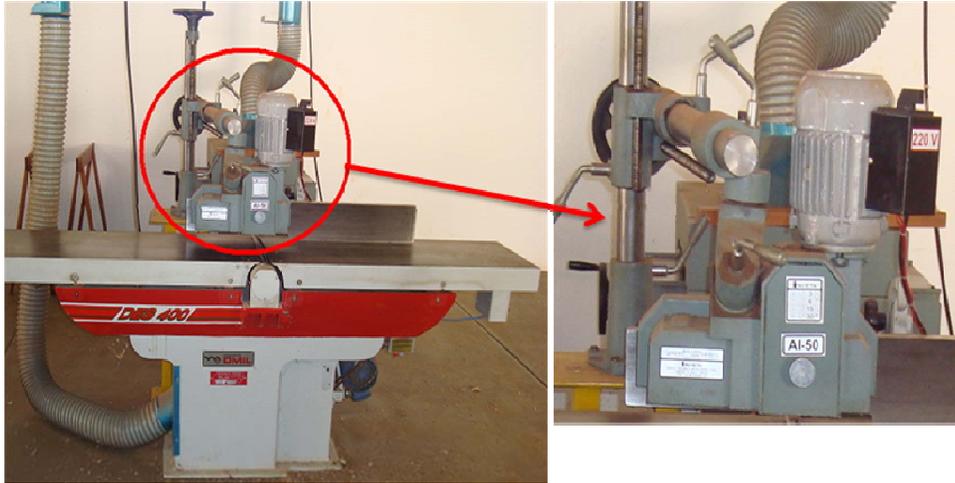


FIGURA 3 Visão frontal da plaina desempenadeira acoplada a um alimentador de avanço.

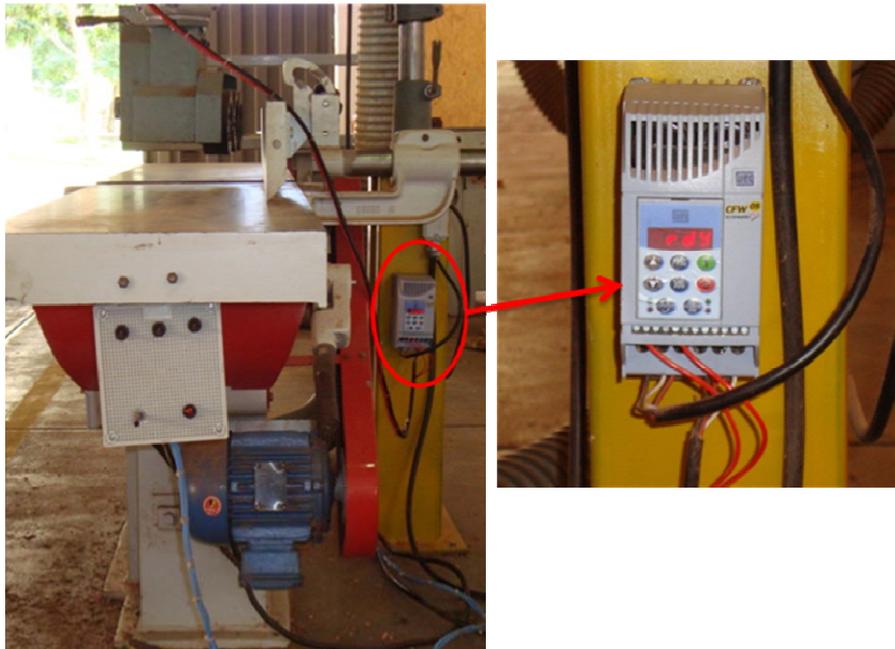


FIGURA 4 Visão lateral da plaina desempenadeira acoplada a um inversor de frequência.

O inversor de frequência foi utilizado com o objetivo de obter velocidades de avanço diferentes das estipuladas pelo alimentador de avanço. O alimentador de avanço permitiu que o deslocamento dos corpos-de-prova sobre a desempenadeira fosse realizado a uma velocidade constante.

Estando os corpos-de-prova preparados, ajustaram-se os parâmetros de usinagem, por meio de ensaios preliminares, segundo especificação da ASTM D 1666-87 (ASTM, 1995). Para isso, os corpos-de-prova foram usinados e cronometraram-se os tempos de usinagem. Assim, foi possível adequar o avanço por dente estipulado pela Norma, em função das velocidades de corte e de avanço determinados.

Com os corpos-de-prova prontos e os parâmetros ajustados, iniciou-se os ensaios de usinagem utilizando os procedimentos descritos por Silva et al. (2005), nos quais passava-se os corpos-de-prova pela plaina desempenadeira com o auxílio de alimentador de avanço. Foram realizados três tratamentos em que a velocidade de corte foi mantida para todos, e variou-se a velocidade de avanço (Tabela 2).

TABELA 2 Descrição dos tratamentos e número de corpos-de-prova ensaiados

Tratamentos	Marcas por polegada	Vf (m*min <sup>-1</sup> )	n (min <sup>-1</sup> )	fz (mm)	Número de corpos-de-prova
1	20	6,82	3690	1,33	154
2	10	12,35	3690	2,82	77
3	5	21,87	3690	6,35	77

Vf = Velocidade de avanço; n = rotação do eixo porta ferramenta; fz = avanço por dente

O número de facas (dentes) utilizado na ferramenta de corte foi de 3, sendo todos eles considerados ativos.

Para evitar a influência do desgaste dos gumes das ferramentas na qualidade das usinagens, os cento e cinquenta e quatro corpos-de-prova foram usinados aleatoriamente.

Na Figura 5 observa-se o ensaio de usinagem realizado na plaina desempenadeira.



FIGURA 5 Ensaio de usinagem realizado na plaina desempenadeira com controle da velocidade de avanço.

### **3.1 Avaliação da qualidade da superfície usinada**

#### **3.1.1 Avaliação conforme ASTM**

Após os ensaios, realizou-se a qualificação das superfícies usinadas pelo método subjetivo com parâmetros pré-estabelecidos, conforme descrito na

ASTM D 1666-87 (ASTM, 1995). Os corpos-de-prova foram avaliados e receberam notas de 1 a 5 de acordo com tipo, distribuição, quantidade e área ocupada pelos defeitos de usinagem existentes nas superfícies, sendo:

- nota 1 – superfície isenta de quaisquer defeitos (Anexo A - Figura 1A);
- nota 2 – presença de arrepimento leve a médio (Anexo A - Figura 2A);
- nota 3 – presença de arrepimento forte e arrancamento leve (Anexo A - Figura 3A);
- nota 4 – presença de arrepimento forte e arrancamento leve a médio (Anexo A - Figura 4A);
- nota 5 – presença de arrancamento forte, independente da presença de arrepimento (Anexo A - Figura 5A).

A sistemática da avaliação da qualidade foi por notas de três avaliadores isolados que foram treinados. As notas de apreciação da superfície com critérios cuidadosamente determinados foram atribuídas separadamente para cada corpo-de-prova. Depois, os três avaliadores reuniram e discutiram sobre as notas dos corpos-de-prova que haviam divergido. Quando não havia consenso fez-se a média aritmética das notas.

### **3.1.2 Rugosímetro**

Para determinação dos parâmetros de rugosidade foi utilizado um rugosímetro de arraste (Figura 6), modelo Surtronic 3+ (Taylor Hobson, 2008).

Foram demarcados retângulos de 10 x 5 mm (C x L) sobre os corpos-de-prova, indicando a localização da medição da rugosidade e uma seta indicando o sentido de medição (Figura 7). Segundo indicação de Silva et al. (2006) o parâmetro que melhor analisa a superfície usinada em madeira é o Ra, sendo esse parâmetro utilizado nesse trabalho para qualificar a superfície usinada.



FIGURA 6 Análise de rugosidade realizada por meio de rugosímetro de arraste.



FIGURA 7 Indicação do local e sentido de medição da rugosidade.

As leituras foram feitas em 45 corpos-de-prova, sendo 15 de cada tratamento. Desses 15 corpos-de-prova, foram três correspondentes a cada uma das cinco notas.

### 3.1.3 Sunset laser

A iluminação do material foi feita no Laboratório de Laser e Óptica e no CEDIA do Departamento de Engenharia/UFLA.

Utilizou-se o *laser* de He-Ne de comprimento de onda de 638 nm (vermelho). A iluminação e a captura de imagens foram realizadas de acordo com a configuração experimental, composta por lente de dispersão, laser,

espelho, câmera de alta resolução para captação das imagens e um computador (Figura 8).



FIGURA 8 Configuração experimental composta pelo laser, lente de dispersão, espelho, câmera e corpo-de-prova.

O *laser* iluminou as superfícies dos corpos-de-prova de forma que o feixe ficasse paralelo as superfícies, similar ao fenômeno do pôr-do-sol em cadeias de montanhas. Assim foi possível observar as irregularidades das superfícies iluminadas. Essa técnica foi denominada de *sunset laser*.

O *laser* foi direcionado para o espelho que refletia a luz sobre a superfície do corpo-de-prova. Quando necessário, eram feitos ajustes no espelho para garantir o paralelismo para obter maior definição das irregularidades na superfície iluminada. Colocou-se uma régua milimetrada ao lado da luz incidente para uma posterior fixação da escala. Após a captura e tratamento das imagens, elas foram transformadas em matrizes de intensidades de cinza (8 bits).

A análise de imagens foi implementada no *Software ImageJ<sup>TM</sup>* (software livre). Foram selecionadas linhas de pixels perpendiculares aos picos do avanço por dente, composta de uma variação de intensidade que foi do branco ao cinza. Os pontos mais claros representavam os picos e os pontos mais escuros representam os vales. A partir dos dados das escalas de cinza foram confeccionados os gráficos correspondentes. Posteriormente, foi feita a suavização da imagem, por meio do filtro Gaussian Blur, Sigma 6.00, que permitiu melhor definição dos picos e dos vales (Figura 9).

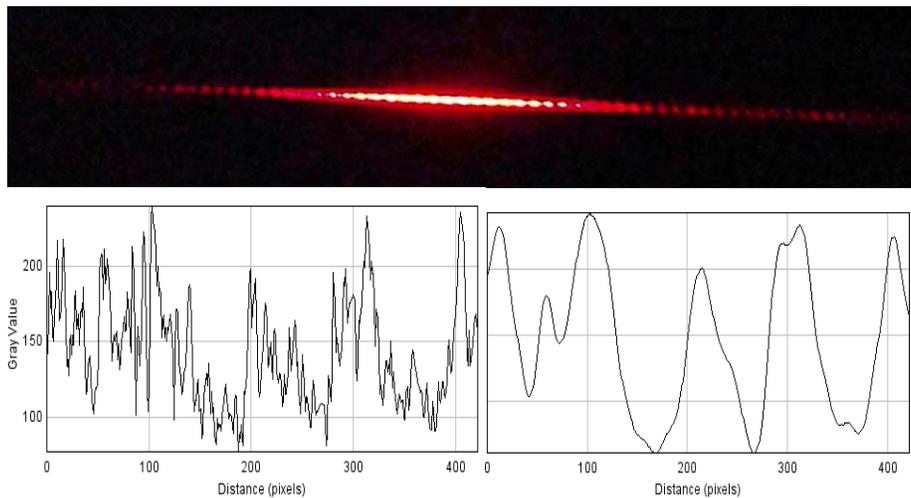


FIGURA 9 Iluminação da superfície usinada com o laser e o gráfico correspondentes sem filtro e após filtragem.

Foram analisados 15 corpos-de-prova, sendo 5 para cada tratamento (avanço por dente obtido), que foram classificados como representativos das notas 1, 2, 3, 4 e 5 segundo adaptação da ASTM D 1666-87 (ASTM, 1995).

### 3.1.4 Análise estatística

Na avaliação estatística do experimento feito para o rugosímetro, para os valores do parâmetro Ra de rugosidade, foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado disposto em esquema fatorial com dois fatores e três repetições.

O modelo estatístico utilizado nesse delineamento foi:

$$Y_{ijk} = \mu + V_i + e_i + N_j + VN_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

Sendo que,  $Y_{ijk}$  = i-ésima observação do avanço por dente i, na j-ésima nota N e na k-ésima repetição;  $\mu$  = constante inerente a todas as observações;  $V_i$  = efeito do i-ésimo avanço por dente i ( $i = 1, 2$  e  $3$ ), efeito fixo;  $N_j$  = efeito da j-ésima nota ( $j = 1, 2, \dots, 5$ ), efeito fixo;  $e_i$  = erro a;  $VN_{ijk}$  = efeito da interação do i-ésimo avanço por dente com a j-ésima nota, efeito aleatório;  $\varepsilon_{ijk}$  = erro b (erro experimental).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As análises da qualidade das superfícies usinadas da madeira de cedro australiano serão discutidas separadamente.

### 4.1 Qualificação por meio da norma ASTM

Os defeitos normalmente observados foram o lasqueamento, o arrancamento de fibras com formações de depressões e o arpejamento (presença de fibras inteiras ou de pedaços destas). Vale salientar que se considera defeito de usinagem aquele que requer re-trabalho para retirá-lo. Assim corpos-de-prova com defeito mais forte ou concentrados requerem mais retrabalho como uso de lixas que corpo-de-prova com defeitos mais leves, mesmo que estes ocupem maior parte da superfície. Os percentuais dos corpos-de-prova classificados por notas, segundo indicação da ASTM D 1666-87 (ASTM, 1995), para três diferentes situações de usinagem, encontram-se na Tabela 3.

TABELA 3 Percentuais das qualidades obtidas para as diferentes situações de usinagem

Avanço por dente (mm)	Percentual de corpos-de-prova por qualidade obtida (%)				
	Nota 1	Nota 2	Nota 3	Nota 4	Nota 5
1,33	21	41	25	13	0
2,82	6	23	31	19	19
6,35	3	9	21	27	40

O maior percentual de corpos-de-prova classificados como excelentes e bons (notas 1 e 2) foi observado no tratamento com avanço por dente de

1,33 mm (20 marcas por polegada). Já o menor percentual dos corpos-de-prova foram classificados como ruins (notas 4), sendo que nenhum corpo-de-prova recebeu nota 5, ou seja, nenhuma superfície foi classificada como muito ruim. Considerando-se que se desejam superfícies isentas de defeitos, sob as condições desse tratamento, a etapa de lixamento para redução de defeitos de usinagem será desnecessária para a maioria das peças.

A maioria dos corpos-de-prova foi classificada com qualidade intermediária (nota 3) ou qualidade boa (nota 2) no tratamento com avanço por dente de 2,82 mm. Observa-se também que ocorreu redução do percentual de corpos-de-prova com a qualidade excelente (nota 1) e aumento do percentual de corpos-de-prova de péssima qualidade (nota 5).

No tratamento com avanço por dente de 6,35 mm, os defeitos de usinagem aumentaram. Nesse tratamento as condições de usinagem impostas a madeira são mais drásticas, o que influenciou na qualidade. Isso é claramente visto nas notas que os corpos-de-prova receberam após a qualificação da superfície usinada. O maior percentual dos corpos-de-prova foi classificado como muito ruim (nota 5) e apenas 3% das peças receberam nota 1, ou seja, não apresentaram defeitos de usinagem. O aumento dos defeitos de usinagem, com consequente redução da qualidade, está relacionado com a estrutura da madeira, pois altas velocidades de avanço aumentam o avanço por dente e provocam maiores arrancamentos e levantamentos de fibras.

O percentual de corpos-de-prova que recebeu nota 1 decresceu com o aumento da velocidade de avanço, isto é, do tratamento com 1,33 mm de avanço por dente para o com 6,35 mm. Já para os corpos-de-prova que receberam nota 5 aconteceu o contrário, eles aumentaram com o aumento da velocidade de avanço, corroborando com os resultados de Silva et al. (2009).

Superfícies usinadas que receberam notas 1 e 2 foram consideradas aprovadas, com qualidade satisfatória. Já aquelas que receberam notas 4 e 5

foram consideradas reprovadas, com qualidade não satisfatória. E as superfícies que receberam nota 3 foram consideradas intermediárias (Silva et al., 2009). Nas Figuras 10, 11 e 12 encontram-se a distribuição gráfica dos percentuais obtidos para cada qualidade da superfície usinada. Observa-se (Figura 10) que 63% dos corpos-de-prova com 1,33 mm de avanço por dente podem ser considerados aprovados, pois recebem notas 1 (21%) e 2 (42%). Esse percentual foi o maior encontrado para a madeira do cedro australiano, que foram classificadas com superfícies excelentes a boas. No tratamento com avanço por dente de 2,82 mm, o maior percentual (31%) aconteceu para a nota 3, em que os corpos-de-prova são considerados de qualidade intermediária. No terceiro tratamento, com avanço por dente de 6,35, os corpos-de-prova considerados reprovados somam 67%, pois 27% recebeu nota 4 (ruim) e 40% recebeu nota 5 (muito ruim).

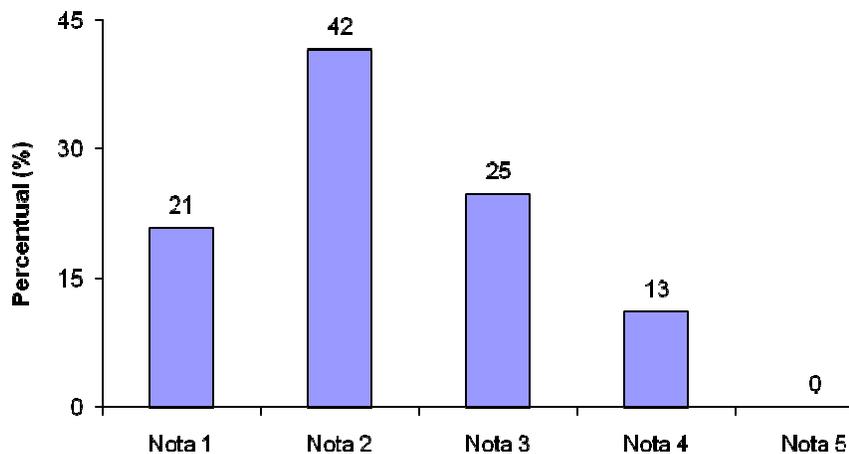


FIGURA 10 Distribuição gráfica dos percentuais dos corpos-de-prova qualificados pela ASTM D 1666-87 (ASTM, 1995), para o avanço por dente de 1,33 mm.

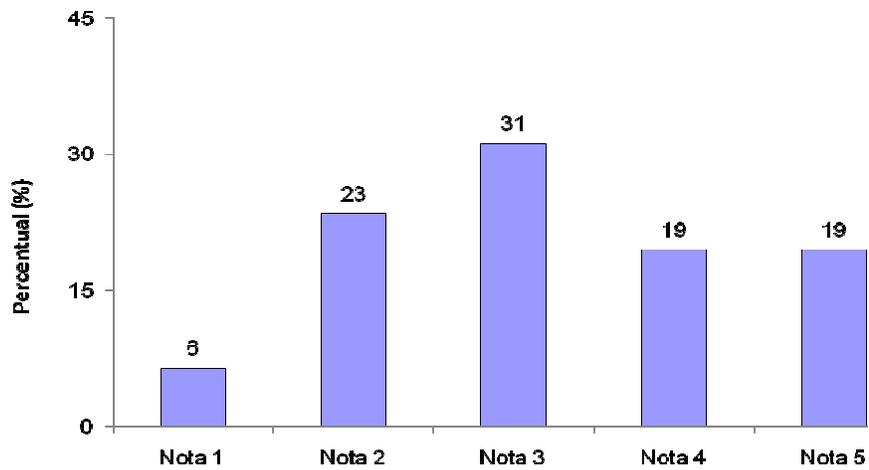


FIGURA 11 Distribuição gráfica dos percentuais dos corpos-de-prova qualificados pela ASTM D 1666-87 (ASTM, 1995), para o avanço por dente de 2,82 mm.

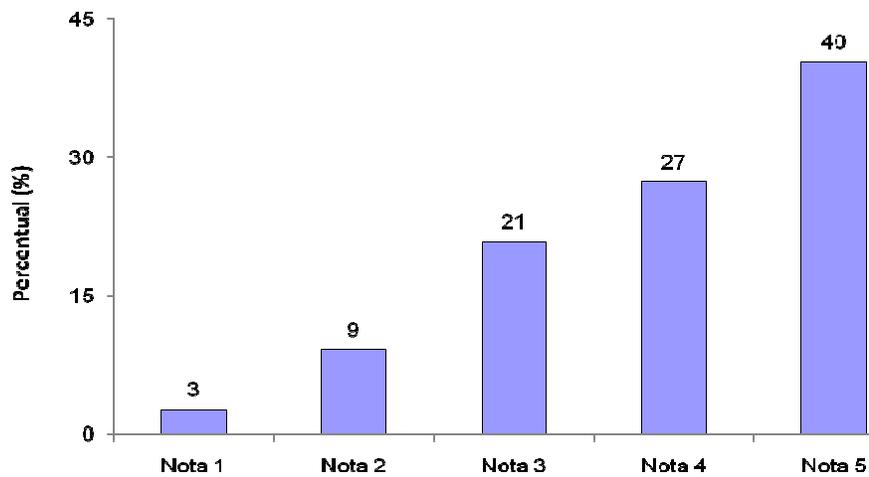


FIGURA 12 Distribuição gráfica dos percentuais dos corpos-de-prova qualificados pela ASTM D 1666-87 (ASTM, 1995), para o avanço por dente de 6,35 mm.

Considerando-se a Tabela 3, para boa qualidade, não se aconselha a usinagem em que se obtém 5 marcas por polegada (avanço por dente de 6,35 mm). Essa pode ser usada quando se deseja uma maior produção sem necessidade de melhor qualidade.

Já a usinagem utilizada no tratamento com avanço por dente de 1,33 mm, em que se obteve 20 marcas por polegada, é considerada de excelente qualidade, sendo assim, indicada para quando se necessita de uma qualidade melhor. Contudo, como a velocidade de avanço é menor, se gasta mais tempo para produzir essas peças, conseqüentemente menor produção. Gastou-se o quádruplo do tempo para usinar cada corpo-de-prova com 1,33 mm de avanço por dente em relação aos com 6,35 mm. Sendo assim, quando se deseja qualidade melhor, mais tempo deve ser gasto na produção.

Na usinagem em que se obteve 10 marcas por polegadas (avanço por dente de 2,82 mm) os corpos-de-prova são classificados como intermediários. Pode-se aumentar o aproveitamento dessas peças com o processo de lixamento. Contudo, esse processo aumenta o tempo de produção, sendo necessária uma avaliação econômica para verificar a viabilidade econômica.

Os percentuais de corpos-de-prova que obtiveram notas por região radial da tora (central, intermediária e externa) estão graficamente representados nas Figuras 13, 14 e 15.

Na Figura 13, com os dados obtidos no tratamento com avanço por dente de 1,33 mm, observa-se que as peças retiradas da região mais central da tora seguiram uma tendência crescente da nota 1 para a nota 4. A região intermediária se comportou de maneira uniforme pra todas as notas. A região externa seguiu uma tendência decrescente da nota 1 para a nota 4.

Observa-se que para nota 1 a maioria dos corpos-de-prova, 53%, encontrava-se na região mais externa da tora. Ainda na nota 1 encontra-se a menor porcentagem, 13%, de corpos-de-prova da região próxima ao centro da

tora. Esse foi um padrão esperado, pois, baseado na relação ‘densidade e usinagem’, na região mais externa há maior densidade e com isso mais peças com qualidade melhor.

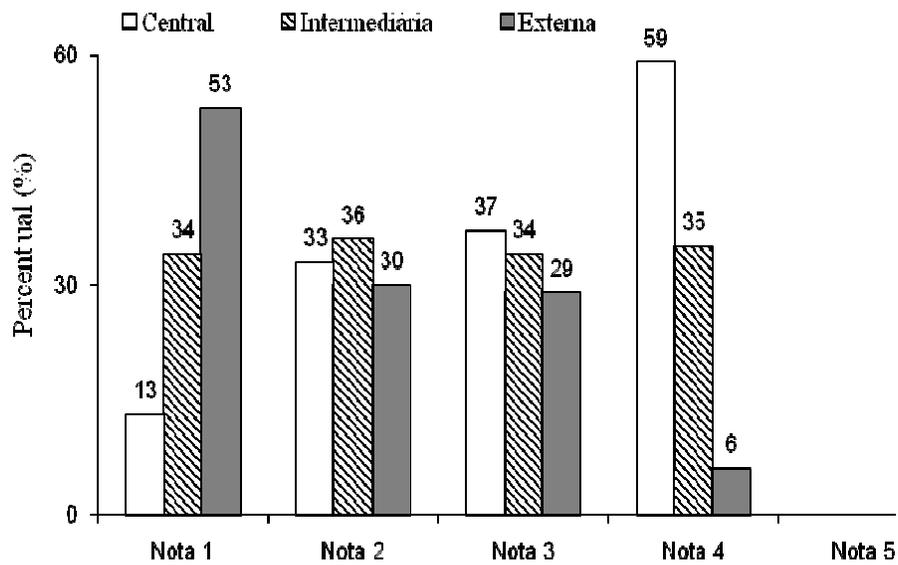


FIGURA 13 Relação entre as regiões de obtenção dos corpos-de-prova (central, intermediária e externa) e as notas, para o avanço por dente de 1,33 mm.

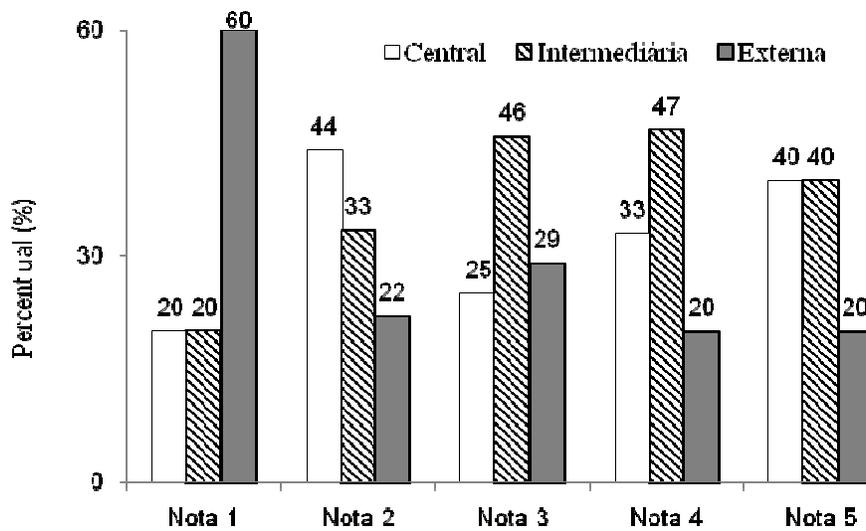


FIGURA 14 Relação entre as regiões de obtenção dos corpos-de-prova (central, intermediária e externa) e as notas, para o avanço por dente de 2,82 mm.

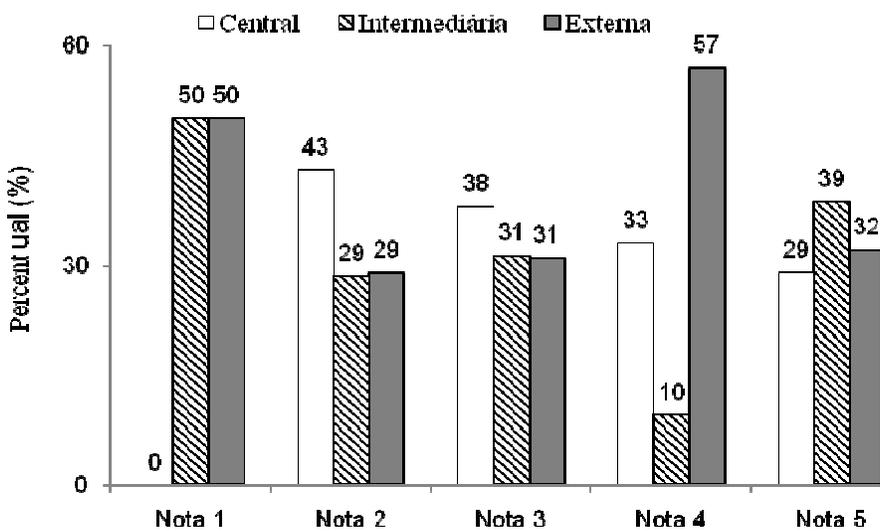


FIGURA 15 Relação entre as regiões de obtenção dos corpos-de-prova (central, intermediária e externa) e as notas, para o tratamento com avanço por dente de 6,35 mm.

Para nota 4 observa-se que os resultados seguiram uma tendência inversa. A maioria dos corpos-de-prova, 59%, era da região mais central da tora, e apenas 6%, a menor porcentagem dos corpos-de-prova, da região mais externa da tora. Novamente está de acordo com a relação ‘densidade e usinagem’, pois se obteve maior número de peças da região mais próxima à medula para a nota considerada ruim, onde se espera menor densidade e conseqüentemente qualidade pior.

Para as três regiões houve uma distribuição similar na nota 2 (central 33%, intermediária 36% e externa 30%). Para essa qualificação (nota 2) observa-se a tendência de mudança do comportamento apresentado na nota 1 para o comportamento apresentado na nota 4 (Figura 13).

Para a qualificação obtida para a nota 3 aconteceu a mudança, só que em proporções menores. Ou seja, segue a mesma tendência da nota 4, em que há mais peças da região central, seguida pela região intermediária e menos peças da região externa, no entanto com o percentual próximo entre as três, 37, 34 e 29% respectivamente.

O comportamento ocorrido no tratamento com avanço por dente de 2,82 mm pode ser observado na Figura 14. Para nota 1, a maior porcentagem também foi da região mais externa da tora, com 60%. Para nota 2, a maioria das peças, 44%, eram da região central. Na nota 3, a região intermediária foi a que teve maior porcentagem, com 46%, seguida pela região externa (29%) e pela região central (25%). Na nota 4 a maior porcentagem também foi da região intermediária (47%), porém seguida pela central (33%) e pela externa (20%). Para nota 5 verificamos que houve a mesma porcentagem para região central e para intermediária, 40%, e apenas 20% para região externa. Como se trata do tratamento com padrão de usinagem intermediário (avanço por dente de 2,82 mm) justifica-se a concentração de corpos-de-prova da região intermediária.

Na Figura 15 tem-se o comportamento ocorrido no tratamento com avanço por dente de 6,35 mm. Nas superfícies qualificadas como excelente (nota 1), 50% dos corpos-de-prova eram da região externa e 50% da região intermediária. Não houve nenhum corpo-de-prova da região central. Vale salientar que nesse tratamento, só 2 corpos-de-prova receberam nota 1. Na nota 2, assim como no tratamento 2, a região central foi a que teve maior porcentagem, 43%. Para a nota 3, a região central também foi a de maior percentual, 38%. Para as superfícies qualificadas como ruins (nota 4), 57% dos corpos-de-prova eram da região externa, seguido pela central (33%) e pela intermediária (10%). Para a nota 5, a maioria dos corpos-de-prova, 39%, eram da região intermediária, 32% da externa e 29% da central.

#### 4.2 Qualificação por meio da rugosidade (Ra)

Os dados coletados no rugosímetro (parâmetro Ra de rugosidade) foram submetidos à análise de variância e na Tabela 4 encontram-se os resultados.

TABELA 4 Resumo da análise de variância para os valores de rugosidade (Ra) da superfície da madeira de cedro australiano em diferentes padrões de usinagem

FV	GL	QM	Fc
Avanço por dente	2	1,67	0,103
Qualidade (nota)	4	206,67	12,775*
Avanço por dente x Qualidade	8	3,83	0,237
Erro	30	16,18	
Total corrigido	44		
CV(%)	63,51		

\* - significativo a 5% de significância, pelo teste de Scott-Knott.

De acordo com a análise de variância, o efeito do avanço por dente foi não significativo, ou seja, estatisticamente não houve diferença entre eles baseado nos valores do parâmetro Ra de rugosidade. Esses resultados corroboram com os encontrados por Silva et al. (2006), que concluíram que a utilização apenas do avanço por dente (fz) para qualificação de uma superfície usinada não é suficiente, visto que houve discrepância desses valores com os parâmetros da rugosidade.

O efeito das notas foi significativo, com 5% de significância. A Tabela 5 mostra a comparação múltipla entre as médias dos valores de rugosidade (Ra).

TABELA 5 Comparação múltipla das médias dos valores de rugosidade (Ra) em diferentes qualidades de superfícies (notas) da madeira de cedro australiano

Qualidade da superfície (Notas)	Médias da rugosidade (Ra)
1	2,67 a
2	3,11 a
3	4,00 a
4	7,78 b
5	14,11 c

Médias seguidas de, pelo menos, uma mesma letra na vertical não diferem entre si a 5% de significância, pelo teste de Scott-Knott.

Observa-se que, em média, foram formados três grupos distintos. O primeiro grupo com as notas 1, 2 e 3 consideradas superfícies de qualidade excelente a razoável. O segundo grupo com a nota 4, considerada superfície de qualidade ruim e o terceiro grupo com a nota 5 com qualidade de superfície considerada muito ruim. Isso quer dizer que, estatisticamente por se considerar erros de medições, a rugosidade das superfícies qualificadas com as notas 1, 2 e

3, foi a mesma, o que diferiu da percepção visual dos avaliadores. Contudo, mesmo sendo consideradas estatisticamente iguais, percebe-se, algebricamente, um aumento na média da nota 1 para a nota 3, indicando assim uma tendência crescente de rugosidade. Já a nota 4 apresentou um valor de Ra, em média, bem maior que as três primeiras, o que foi coerente com a nota dada pelos avaliadores. A superfície qualificada como muito ruim (nota 5) apresentou, em média, aproximadamente o dobro do valor da rugosidade (Ra) apresentada pela superfície de qualidade ruim (nota 4). Valores de altas rugosidades indicam que a superfície contém mais defeitos de usinagem, validando assim a avaliação feita. Esses resultados sugerem, a princípio, que teriam apenas três notas.

Observa-se pela Tabela 4 que o efeito de interação do avanço por dente com a qualidade (notas) foi não significativo para madeira de cedro australiano, não sendo necessário o desdobramento.

O coeficiente de variação (CV) foi alto (63,51%), em detrimento da alta variação dos valores de Ra entre as diferentes notas.

#### **4.3 Qualificação por meio de imagens de um laser (sunset)**

Na qualificação da superfície usinada da madeira de cedro australiano por meio de análise de imagem do laser He-Ne, os corpos-de-prova foram avaliados nos avanços por dente de 1,33 mm, de 2,82 mm e 6,35 mm. Em cada tratamento foram avaliadas superfícies classificadas como excelente (nota 1), boa (nota 2), regular (nota 3), ruim (nota 4) e muito ruim (nota 5), que serão discutidos separadamente. Vale lembrar que se trata de dados adquiridos de uma imagem transformada, de graus de cinza (*greyscale*), em uma matriz de números inteiros, representando cada *pixel* da imagem com valores entre 0 e 255, indicando desde a cor branca, valor 255, até a cor preta, valor 0. Foi calculada a diferença entre os picos, regiões altas e os vales, regiões baixas, que inferiram sobre a rugosidade das superfícies avaliadas (Tabela 6).

TABELA 6 Valores dos picos mais altos, vales mais baixos e sua diferença, obtidos de imagens transformadas de graus de cinza em números inteiros, em diferentes qualidades de superfícies (notas) da madeira de cedro australiano

Tratamentos	Notas	Picos (máx.)	Vales (mín.)	Diferença
1	1	237	206	31
	2	128	82	46
	3	169	101	68
	4	152	68	84
	5	223	103	120
2	1	172	106	66
	2	226	158	68
	3	251	177	74
	4	230	151	79
	5	251	165	86
3	1	232	134	98
	2	180	82	98
	3	249	148	101
	4	255	149	106
	5	243	91	152

Tratamento 1 = avanço por dente de 1,33 mm; tratamento 2 = avanço por dente de 2,82 mm; tratamento 3 = avanço por dente de 6,35 mm.

#### 4.3.1 Avanço por dente de 1,33 mm

Observa-se na Tabela 6 que para o avanço por dente de 1,33 mm a superfície qualificada como excelente (nota 1), na escala de graus de cinza, teve o pico mais alto com o valor de 237 e o menor vale teve o valor de 206. Assim, a diferença desses valores foi de 31. Essa diferença apresenta a superfície como de baixa rugosidade.

Para os valores obtidos para os corpos-de-prova com superfície qualificada como boa (nota 2), a diferença foi de 46. Nota-se que a diferença aumentou da nota 1 para a 2, o que indica uma superfície com maior rugosidade.

A superfície usinada qualificada como regular (nota 3) obteve uma diferença de 68 (Tabela 6). Observa-se que essa diferença foi maior que a obtida para a nota 2. Esse fato, confirma que a superfície qualificada como regular (nota 3) é uma transição entre as superfícies qualificadas como satisfatórias e não satisfatórias, principalmente entre a superfície qualificada como boa (nota 2) e a qualificada como ruim (nota 4).

Para os valores obtidos para a superfície qualificada como ruim (nota 4) a diferença foi de 84 (Tabela 6). Percebe-se que a diferença apresentada por essa superfície considerada ruim é maior que da superfície anterior considerada regular. Esse aumento indica maior rugosidade dessa superfície.

Nos valores obtidos para a superfície qualificada como muito ruim (nota 5), a diferença foi de 120 (Tabela 6). Observa-se que essa foi a maior diferença entre as superfícies analisadas, com isso, infere-se que a superfície qualificada como muito ruim é a que possui a maior rugosidade.

As superfícies qualificadas como excelente (nota 1) e muito ruim (nota 5) tem o seus perfis gráficos representados nas Figuras 16 e 17.

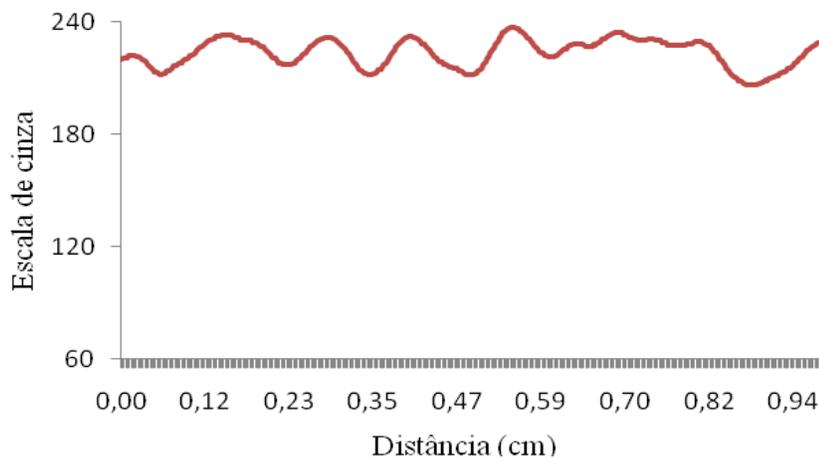


FIGURA 16 Perfil gráfico de uma superfície qualificada como excelente (nota 1) com avanço por dente de 1,33 mm.

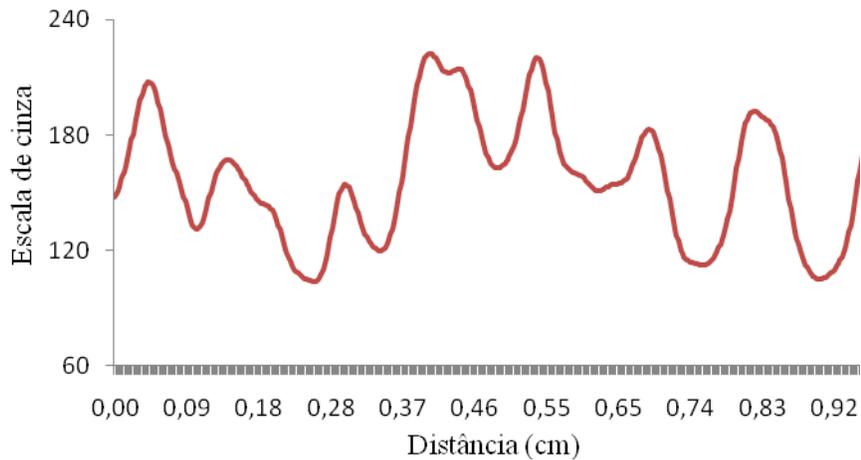


FIGURA 17 Perfil gráfico de uma superfície qualificada como muito ruim (nota 5) com avanço por dente de 1,33 mm.

#### 4.3.2 Avanço por dente de 2,82 mm

Observa-se na Tabela 6 que, para o avanço por dente de 2,82 mm, a diferença de valores entre o pico mais alto e o vale mais baixo foi de 66, para a superfície qualificada como excelente (nota 1). Observa-se que essa diferença pode ser considerada baixa. Contudo, se compararmos com a superfície também qualificada como excelente (nota 1), mas com o avanço por dente de 1,33 mm o valor apresentado foi maior. Esse fato indica que o tratamento 2 possui maior rugosidade que o tratamento 1.

Nos valores obtidos para a superfície qualificada como boa (nota 2) a maior oscilação foi de 68. Observa-se que esse valor é superior ao encontrado para superfície qualificada como excelente (nota 1), que foi de 66. Ao comparar com a superfície de mesma qualificação (boa - nota 2), mas com avanço por dente de 1,33 mm, que recebeu valor de 46, observa-se que também foi superior. Mais uma vez o tratamento 2 possui maior rugosidade que o tratamento 1.

Para a superfície qualificada como regular (nota 3) observa-se que houve uma maior oscilação dos valores. A diferença entre o pico mais alto e o vale mais baixo foi de 74, na escala de cinzas. Essa diferença também foi maior quando comparada com a superfície de mesma qualificação regular, mas para o avanço por dente de 1,33 mm, que recebeu valor de 40 (Tabela 6). Isso indica que o avanço por dente de 2,82 mm possui maior rugosidade que aquele de 1,33 mm. Na superfície qualificada como ruim (nota 4) os valores variaram em maior amplitude, com diferença de 79. Observa-se que essa diferença é maior que as demais superfícies com avanço por dente de 2,82 mm. Ou seja, a superfície qualificada como ruim (nota 4) apresenta alta rugosidade.

A superfície qualificada como muito ruim (nota 5) apresentou a maior amplitude de variação na escala de cinza (Tabela 6), que foi de 86. Essa amplitude permite afirmar que a superfície qualificada como muito ruim (nota 5) apresentou maior rugosidade. Observaram-se a presença de arrancamentos de fibras mais profundos, que foram considerados os maiores defeitos de usinagem.

Os comportamentos das superfícies qualificadas pela iluminação do *laser* como excelente (nota 1) e muito ruim (nota 5) encontram-se nas Figuras 18 e 19, respectivamente.

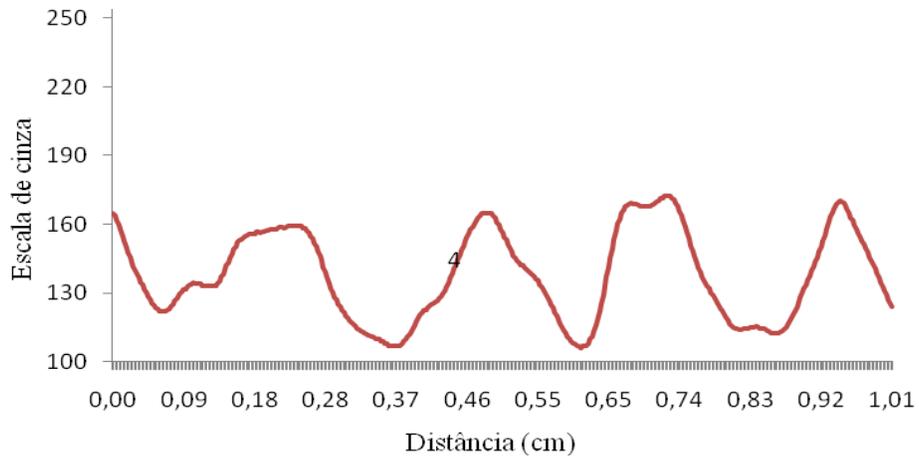


FIGURA 18 Perfil gráfico de uma superfície qualificada como excelente (nota 1) com avanço por dente de 2,82 mm.

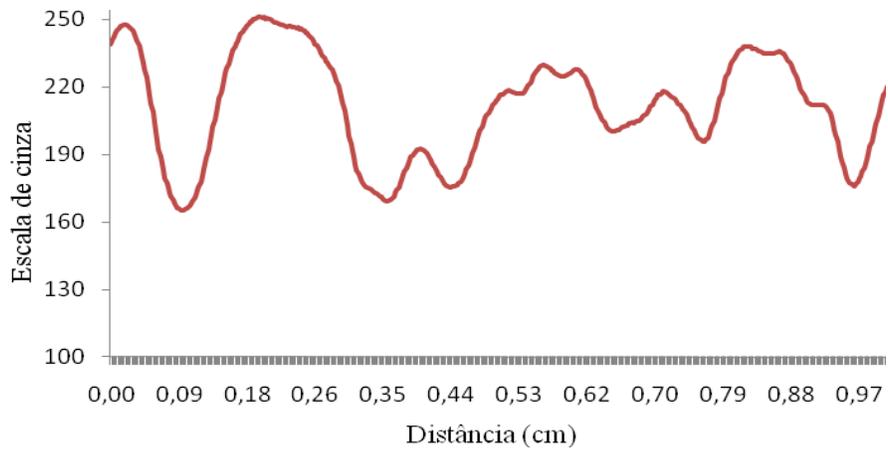


FIGURA 19 Perfil gráfico de uma superfície qualificada como muito ruim (nota 5) com avanço por dente de 2,82 mm.

### **4.3.3 Avanço por dente de 6,35 mm**

Na Tabela 6 podem-se observar valores das superfícies avaliadas para o avanço por dente de 6,35 mm. A superfície qualificada como excelente (nota 1) obteve o pico mais alto com o valor de 232 e o vale mais baixo de 134 na escala de cinza, com uma diferença de 98. Esse foi o maior valor quando comparado com as superfícies que receberam qualificação excelente (nota 1) dos outros tratamentos (Tabela 6).

Para a superfície qualificada como boa (nota 2) a amplitude entre o maior pico e o menor vale foi de 98 (Tabela 6). Para as superfícies qualificadas como boa, dos três tratamentos, essa foi a que apresentou maior valor (98), pois o tratamento com avanço por dente de 2,82 mm obteve uma amplitude de 68 e o tratamento com avanço por dente de 1,33 mm obteve amplitude de 46.

Dos valores obtidos para a superfície qualificada como regular (nota 3) a maior amplitude foi de 101 (Tabela 6). Valor maior que aquele apresentado para a superfície qualificada como boa (nota 2). Mais uma vez a diferença entre o pico mais alto e o vale mais baixo para o tratamento com avanço por dente de 6,35 mm foi maior que os outros tratamentos (diferença de 74 para 2,82 mm e de 68 para 1,33 mm). Esse fato indica que o tratamento com avanço por dente de 6,35 mm é o que apresenta maior rugosidade nas superfícies usinadas.

Para a superfície qualificada como ruim (nota 4) a amplitude de variação dos valores foi de 106, pois o menor vale foi de 149, e o maior pico de 255 (Tabela 6). Essa diferença de 106 foi maior quando comparada com as superfícies de mesma qualificação com 2,82 mm de avanço por dente (79) e com 1,33 mm de avanço por dente (84).

A superfície qualificada como muito ruim (nota 5) foi a superfície com maior distância entre o pico mais alto e o vale mais baixo, com um valor de 152. Os valores variaram de 92 a 243 (Tabela 6). Observa-se que essa foi a maior diferença entre todas as superfícies qualificadas com avanço por dente de 6,35

mm e a maior diferença de todos os tratamentos. Isso indica que a superfície qualificada como muito ruim (nota 5) caracteriza maior rugosidade da superfície e que o tratamento com 6,35 mm de avanço por dente foi o que causou os maiores defeitos de usinagem.

Os comportamentos das superfícies que foram qualificadas como excelente (nota 1) e muito ruim (nota 5) estão graficamente representados nas Figuras 20 e 21.

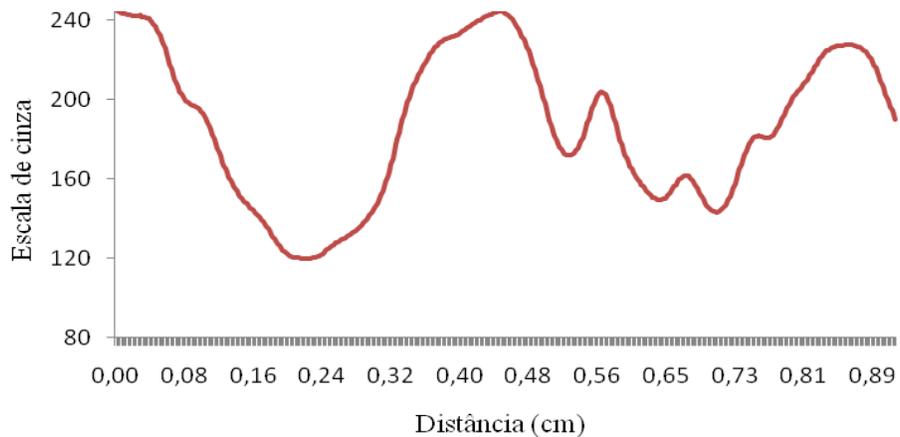


FIGURA 20 Perfil gráfico de uma superfície qualificada como excelente (nota 1) com avanço por dente de 6,35 mm.

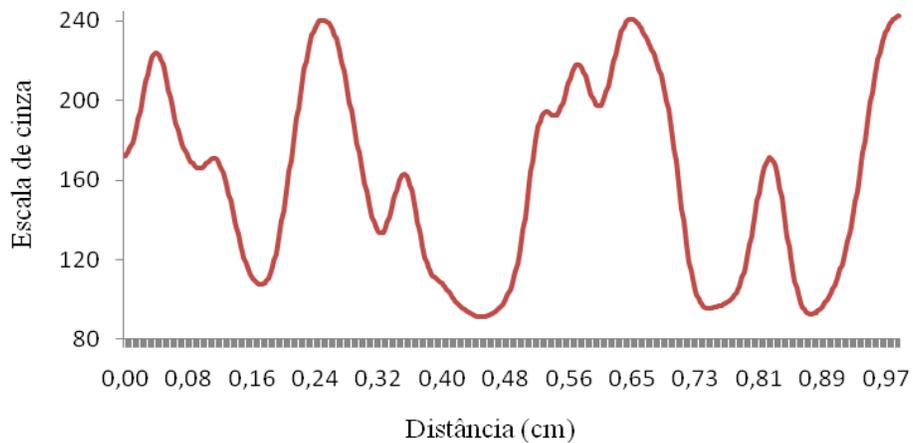


FIGURA 21 Perfil gráfico de uma superfície qualificada como muito ruim (nota 5) com avanço por dente de 6,35 mm.

Pelas análises dos dados coletados por meio do laser e processados pelo software ImageJ e pelo Excel, constatou-se a existência de um padrão de variação dos corpos-de-prova, semelhantemente ao encontrado pela classificação de acordo com a ASTM D 1666-87 (ASTM, 1995). Assim, o uso do laser em análise de rugosidade de materiais apresenta-se como uma técnica promissora. Contudo, observou a necessidade de criação de “macros” nas planilhas eletrônicas para acelerar a geração de relatórios da rugosidade e do avanço por dente.

## 5 CONCLUSÕES

- ✓ A madeira de *Toona ciliata* M. Roem apresentou superfícies usinadas de boa qualidade, mostrando-se apta para confecção de produtos sólidos.
- ✓ Para o padrão de usinagem com avanço por dente de 1,33 mm 63% dos corpos-de-prova foram considerados satisfatórios;
- ✓ Para o padrão de usinagem com avanço por dente de 6,35 mm 67% dos corpos-de-prova foram considerados não satisfatórios;
- ✓ Para o padrão de usinagem com avanço por dente de 1,33 mm a maioria dos corpos-de-prova que recebeu nota 1 eram da região externa e a maioria dos que recebeu nota 4 eram da região central;
- ✓ De acordo com o parâmetro de rugosidade Ra as superfícies as quais se atribuiu as notas 1, 2 e 3 possuem a mesma rugosidade;
- ✓ O tratamento com 6,35 mm de avanço por dente foi o que causou os maiores defeitos de usinagem;
- ✓ É possível realizar qualificação de superfícies usinadas com a metodologia proposta utilizando o laser.
- ✓ Pela metodologia de uso do laser, o tratamento com avanço por dente de 1,33 mm foi o que apresentou melhor qualidade.
- ✓ O tratamento com avanço por dente de 6,35 mm foi o que apresentou a pior qualidade pela metodologia utilizando o laser.

## 6 SUGESTÃO

A partir dos valores do parâmetro de rugosidade Ra sugere-se nova classificação com apenas 3 classes de qualidade, diferentemente das 5 classes prevista na norma ASTM D1666-87 (ASTM , 1995).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 1666-87**: standard method for conducting machining tests of wood and wood base materials (reapproved 1994). Philadelphia, 1995. p. 226-245.

ARES, A.; FOWNES, J. H. Productivity, nutrient, and water-use efficiency of *Eucalyptus saligna* and *Toona ciliata* in Hawaii. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 139, n. 1/3, p. 227-236, Dec. 2000.

BET, L. **Estudo da medição da textura de superfícies com sondas mecânicas e com sondas ópticas tipo seguidor**. 1999. 243 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

BONDUELLE, A.; CRUZ, S. R. da; SILVA, J. R. M. **Processo mecânico da madeira**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2002. 26 p. Notas de aula.

BONDUELLE, A. F. **Caracterisation du panneau de particules surface melamine par son aptitude a l'usinabilite**. 1994. 196 f. Tese (Doctem em Sciences du Bois) – Université Henri Poincaré Nancy I, Nancy.

BONDUELLE, A. Usinagem, material de corte e desgaste do gume. **Revista da Madeira**, Curitiba, n. 64, p. 80-86, maio 2002.

BONDUELLE, A. Usinagem, qualidade e custo. **Revista da Madeira**, Curitiba, n. 61, p. 82-86, nov. 2001.

CASTRO-GAMBOA, I. **Estudo fitoquímico da raiz de *Toona ciliata* e do cavalo do enxerto de *Toona ciliata*/*Cedrela odorata*: uma contribuição à quimiosistemática e à ecologia na interação *Hypsipyla-Meliaceae***. 2000. 212 p. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.

CUNNINGHAM, S. A.; FLOYD, R. B.; GRIFFITHS, M. W.; WYLIE, F. R. Patterns of host use by the shoot-borer *Hypsipyla robusta* (Pyralidae: Lepidoptera) comparing five Meliaceae tree species in Asia and Australia. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 205, n. 1/3, p. 351-357, Feb. 2005.

FARIA, R. O.; BRAGA JUNIOR, R. A.; ROCHA NETO, A. E.; TRINDADE, N.; MORI, F. A.; HORGAN, G. W. Reliability of wood grain orientation measurements using laser illumination. **Biosystems Engineering**, Edinburgh, v. 100, n. 4, p. 479- 483, Aug. 2008.

FARIAS, M. G. **As questões ambientais e o processo de fresamento em alta velocidade de madeiras de floresta plantada *eucalyptus grandis* e *eucalyptus dunnii***. 2000. 198 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

FOREST BRAZIL. Cedro australiano: valorização de espécies nobres. **Boletim Florestal Informativo Florestal do Norte Pioneiro**, São Paulo, v. 2, n. 7, p. 1-4, fev. 2008. Disponível em: <[http://www.forestbrazil.com.br/images/admin/boletim\\_1202960284.pdf](http://www.forestbrazil.com.br/images/admin/boletim_1202960284.pdf)>. Acesso em: 09 set. 2008.

HASSE, G. Promessas do cedro australiano. **Jornal Século Diário**, Vitória, 07 jun. 2005. Disponível em: <<http://www.seculodiario.com.br/arquivo/2005/junho/07/index.asp>>. Acesso em: 21 dez. 2009.

HECHT, E. **Optics**. 4. ed. New York: A. Wesley, 2001. 680 p.

HU, C.; TANAKA, C.; OHTANI, T. On-line determination of the grain angle using ellipse analysis of the laser light scattering pattern image. **Journal of Wood Science**, v. 50, n. 4, p. 321-326, Aug. 2004.

KININMONTH, J. A.; WHITEHOUSE, L. J. **Properties and use of New Zealand radiata pine**: wood properties. New Zealand: Forest Research Institute, 1991. v. 1, p. 13-18.

KOCH, P. **Wood machining processes**. New York: Ronald, 1964. 530 p.

KOLLMANN, F. F. P.; CÔTÉ, W. A. J. **Principles of wood science and technology**. New York: Springer Verlag, 1984. v.1, 592 p.

LEITZ. **Das leitz lexikon**. 3. ed. Unterschneidheim: [S.l.: s.n.], 2001.

LOPES, D. M. F. **Comparação da qualidade de superfície da madeira usinada do *Eucalyptus grandis* Hill Ex. Maiden através do método de medição direta e da equação do avanço por dente**. 2003. 48 p. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

LUCAS FILHO, F. C. **Análise da usinagem de madeiras visando a melhoria de processos em indústrias de móveis.** 2004. 1741 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

LUCAS FILHO, F. C. **Influência do teor de umidade e da massa específica aparente sobre a resistência e rigidez das madeiras de *Pinus elliottii*, *E. e Pinus taeda* L.** 1997. 101p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

MC KENZIE, W. M. Fundamental aspects of the wood cutting process. **Forest Products Journal**, Madison, v. 10, n. 9, p. 447-456, June, 1964.

NERI, A. C.; GONÇALVES, R. Mecanismo de formação de cavacos na usinagem da madeira de eucalipto. In: Congresso, ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRAS, 7., 2002, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: IBRAMEM, 2002. 1 CD-ROM.

PANSHIN, A. J.; DE ZEEUW, C. **Textbook of wood technology.** New York: McGraw-Hill, 1980. 722 p.

PINHEIRO, A. L.; LANI, L. L.; COUTO, L. **Cultura do cedro australiano para produção de madeira serrada.** Viçosa, MG: UFV, 2003. 42 p.

SANTOS, J. C. **Análise do comportamento das forças em função dos parâmetros de corte na usinagem de madeiras.** 1999. 136 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

SILVA, J. R. M.; BRAGA, P. P. C.; MARTINS, M. Identificação de parâmetros de rugosidade para qualificação de pisos de *eucalyptus grandis*. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 11., 2008, Londrina. **Anais...** Londrina: EBRAMEN, 2008. 1 CD-ROM.

SILVA, J. R. M.; COSTA JÚNIOR, J. S.; MENDES, L. M.; TRUGILHO, P. F. **Afiação de ferramentas para o setor madeireiro.** Lavras: UFLA/DCF, 1996. 37 p.

SILVA, J. R. M.; LIMA, J. T.; BRAGA, P. P. C.; TRUGILHO, P. F. A utilização de rugosímetro na qualificação de superfícies usinadas em madeiras de *Eucalyptus* sp. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 10., 2006, São Pedro. **Anais...** São Pedro: EBRAMEN, 2006. 1 CD-ROM.

SILVA, J. R. M.; MARTINS, M.; OLIVEIRA, G. M. V.; BRAGA, P. P. C. Parâmetros de Qualidade da usinagem para determinação dos diferentes usos da madeira de *Eucalyptus*. **Cerne**, Lavras, v. 15, n. 1, p. 75-83, jan./mar. 2009.

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, n. 3, p.05-26, maio 1999. (Boletim técnico).

SILVA, J. R. M.; MORI, F. A.; RABELO, G. F.; BRAGA JÚNIOR, R. A. Interação da luz laser para a avaliação da textura de madeiras nativas e de *Eucalyptus grandis* W.Hill ex Maiden. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 15, n. 2, p. 167-175, 2005.

SILVA, J. R. M. **Relações da usinabilidade e aderência do verniz com as propriedades fundamentais do *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden.** 2002. 179 f. Dissertação (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

SIMONAHO, S. P.; PALVIAINEN, J.; TOLONEN, Y.; SILVEINNOINEN, R. Determination of wood grain direction from laser light scattering attern. **Optics and Laser in Engineering**, London, v. 41, n. 1, p. 95-103, Jan. 2004.

SOUZA, J. C. A. V. **Propagação vegetativa de cedro australiano (*Toona ciliata* M. Roem) por Miniestaquia.** 2007. 54 p. 2007. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes.

TAYLOR HOBSON. **Surtronic 3+ operating instructions.** Disponível em: <<http://www.taylorhobson.com.br/detalhes.asp?linha=1&categ=1>>. Acesso em: 20 out. 2008.

VERRIL, S.; SIMPSON, W. T. **Programa de secagem:** programa sugerido por software. Disponível em: <[www1.fpl.fs.fed.us/dryprog.html](http://www1.fpl.fs.fed.us/dryprog.html)> . Acesso em: 22 dez. 2009.

WIKIPÉDIA. A Enciclopédia Livre. **Qualidade**. Disponível em:  
<<http://pt.wikipedia.org/wiki/Qualidade>>. Acesso em: 21 dez. 2009.

WORLD AGROFORESTRY CENTRE. Agroforestry Database. **A tree species reference and selection guide**. Disponível em:  
<<http://www.worldagroforestrycentre.org/sea/Products/AFDbases/af/asp/SpeciesInfo.asp?SpID=1649#Identity>> . Acesso em: 12 mar. 2008.

ZENID, G. J. **Noções sobre classificação de toras e de madeira serrada:** divisão de madeiras, IPT, madeira, o que é e como pode ser processada e utilizada. São Paulo: IPT, 1989. 189 p. (Boletim ABPM, 36).

## ANEXOS

ANEXO A		Página
FIGURA 1A	Superfície isenta de quaisquer defeitos, qualificada pela nota 1.....	59
FIGURA 2A	Superfície com arrepimento leve a médio, qualificada pela nota 2.....	59
FIGURA 3A	Superfície com arrepimento forte e arrancamento leve, qualificada pela nota 3.....	60
FIGURA 4A	Superfície com arrepimento forte e arrancamento leve a médio, qualificada pela nota 4.....	60
FIGURA 5A	Superfície com arrancamento forte, independente da presença de arrepimento, qualificada pela nota 5.....	61

## ANEXO A

FIGURA 1A Superfície isenta de quaisquer defeitos, qualificada pela nota 1

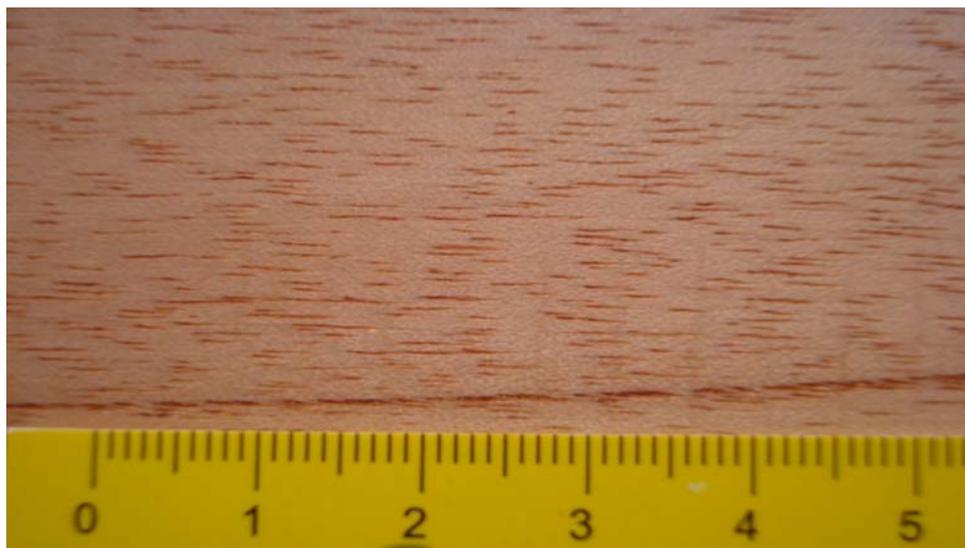


FIGURA 2A Superfície com arrepimento leve a médio, qualificada pela nota 2

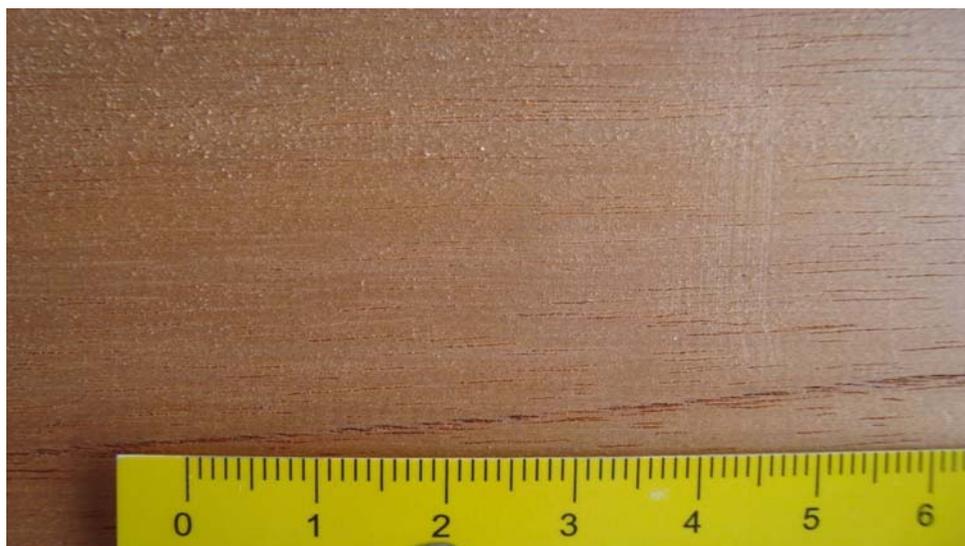


FIGURA 3A Superfície com arrefiamento forte e arrancamento leve, qualificada pela nota 3



FIGURA 4A Superfície com arrefiamento forte e arrancamento leve a médio, qualificada pela nota 4



FIGURA 5A Superfície com arrancamento forte, independente da presença de arrepimento, qualificada pela nota 5

