



ANNA CAROLINA DE ALMEIDA ANDRADE

***SUNSET LASER NA ANÁLISE DE DEFEITOS
EM MADEIRAS USINADAS***

LAVRAS – MG

2015

ANNA CAROLINA DE ALMEIDA ANDRADE

***SUNSET LASER NA ANÁLISE DE DEFEITOS EM MADEIRAS
USINADAS***

Dissertação apresentada á 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 de título de Mestre.

Orientador

Dr. José Reinaldo Moreira da Silva

Coorientadores

Dr. Roberto Alves Braga Júnior

Dr. Paulo Ricardo Gherardi Hein

LAVRAS-MG

2015

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Andrade, Anna Carolina de Almeida.

Sunset laser na análise de defeitos em madeiras usinadas / Anna
Carolina de Almeida Andrade. – Lavras : UFLA, 2015.

40 p. : il.

Dissertação (mestrado acadêmico)–Universidade Federal de
Lavras, 2015.

Orientador: José Reinaldo Moreira da Silva.

Bibliografia.

1. Qualidade. 2. Processamento mecânico. 3. Laser. I.
Universidade Federal de Lavras. II. Título.

ANNA CAROLINA DE ALMEIDA ANDRADE

***SUNSET LASER NA ANÁLISE DE DEFEITOS EM MADEIRAS
USINADAS***

Dissertação apresentada á 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 de título de Mestre.

APROVADA em 20 de fevereiro de 2015.

Dr. Roberto Alves Braga Júnior UFLA

Dr. Márcio Pereira da Rocha UFPR

Dr. José Reinaldo Moreira da Silva
Orientador

**LAVRAS – MG
2015**

À minha família

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, pela oportunidade de realização deste trabalho.

À Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudo.

À Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG - PROCESSO N.: CAG - APQ-02185-13) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelos recursos que permitiram aquisição de equipamentos.

Aos professores que muito me ajudaram durante todo o mestrado.

Ao professor Dr. José Reinaldo, pela orientação e dedicação na passagem de seu conhecimento, que foi de muita relevância para a realização deste trabalho. Também, aos professores Roberto Braga e Paulo Hein pela coorientação, apoio e incentivo.

Aos amigos da “Família CTM”, por tantas vezes que me ajudaram, quando não era possível seguir só.

Aos meus amigos Lidy, Amém, Vlad, Carol, Lulu, Marcos, Mat e Lucas, por serem minha família em Lavras.

À minha mãe, pelos abraços que não foram dados, mas foram sentidos.

Ao meu pai, por todo apoio dado.

À minha irmã, por ser a melhor parte de mim.

Ao Rafael, por tudo que vivemos juntos e pelo que ainda vamos viver.

RESUMO

A qualificação da superfície usinada serve para indicar usos adequados para a madeira. A busca por metodologias capazes de qualificar a superfície usinada e que possuam caráter de repetitividade e reprodutibilidade vem crescendo no setor moveleiro. Assim, os objetivos deste trabalho foram desenvolver e testar técnicas de qualificação de superfícies, por meio da medição de defeitos, utilizando a técnica sunset laser, comparando-a com a medição do avanço por dente e com a norma de qualificação visual de superfícies usinadas – ASTM D 1666-11/2011. Para isso, utilizou-se plaina desempenadeira com diferentes velocidades de avanço, a fim de produzir todas as classes de defeitos na superfície usinada. Observou-se forte relação entre a área de defeito, iluminada pelo sunset laser e as notas atribuídas pela avaliação visual ($R^2 = 0,861$) e entre a área do defeito e o avanço por dente medido ($R^2 = 0,878$). Concluiu-se que a técnica sunset laser é capaz de qualificar a superfície usinada, mostrando-se mais eficiente que a qualificação visual para classificar os corpos de prova, principalmente os classificados como notas sucessivas.

Palavras-chave: Qualidade. Processamento mecânico. Laser.

ABSTRACT

The qualification of the machined surface serves to indicate appropriate uses for wood. The search for methods capable of qualifying the machined surface and which possess character of repeatability and reproducibility has grown in the furniture sector. Thus, the objectives of this study were to develop and test surfaces qualification techniques, by measuring defects using the sunset laser technique, comparing them with the feeding per tooth and with the visual qualification of machined surfaces norm - ASTM D 1666-11 (2011). To do this, we used a plane trowel with different feeding rates in order to produce all classes of machined surface defects. We observed a strong relation between the defect area, illuminated by the sunset laser, and the grades attributed by the visual evaluation ($R^2 = 0.861$), as well as between the defect area and the measured feeding per tooth ($R^2 = 0.878$). We concluded that the sunset laser technique is capable of qualifying the machined surface, being more efficient than the visual qualification in classifying the samples, especially those classified with successive grades.

Keywords: Quality. Mechanical processing. Laser.

LISTA DE TABELAS

Figura 1	Valores normativos de aplainamento, em que fz = avanço por dente, t = profundidade do arco ciclóide, V_c = velocidade de corte e V_f = velocidade de avanço.	14
Figura 2	<i>Setup</i> do processo de aplainamento	19
Figura 3	<i>Setup</i> para a obtenção das imagens para análise	21
Figura 4	Imagens de superfícies iluminadas com o laser de diodo, A) Imagem original, formato RGB color. B) Imagem em escala de cinza (8 bit). C) Imagem binarizada.....	22
Figura 5	Demonstração da área de análise do defeito	23
Figura 6	Relação entre o avanço por dente e a área do defeito em superfícies processadas mecanicamente medida pelo <i>sunset</i> laser	27
Figura 7	Corpo de prova qualificado de acordo com a classificação da ASTM D 1666-11 (ASTM, 2011) como excelente (nota 1)	29
Figura 8	Corpo de prova qualificado de acordo com a classificação da ASTM D 1666-11 (ASTM, 2011) como boa qualidade da superfície aplainada (nota 2).....	30
Figura 9	Corpo de prova qualificado de acordo com a classificação da ASTM D 1666-11 (ASTM, 2011) como qualidade da superfície aplainada regular (nota 3).....	31
Figura 10	Corpo de prova qualificado de acordo com a classificação da ASTM D 1666-11 (ASTM, 2011) como qualidade da superfície aplainada ruim (nota 4).....	32
Figura 11	Corpo de prova qualificado de acordo com a classificação da ASTM D 1666-11 (ASTM, 2011) como qualidade da superfície aplainada muito ruim (nota 5).....	33

Figura 12	Corpos de prova iluminados pelo <i>sunset</i> laser e qualificados por meio da classificação da ASTM D 1666 11 (ASTM, 2011) A) corpo de prova qualificado como nota 3 e classificado com regular, nos detalhes destacados estão os arrancamentos leves B) corpo de prova qualificado como nota 4 e classificado com ruim, nos detalhes destacados estão os arrancamentos leves a médios.....	35
Figura 13	Relação entre a qualidade e a percentagem da área do defeito medida pelo <i>sunset</i> laser em superfícies processadas mecanicamente.....	36

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1	Qualificação da superfície usinada	13
2.1.1	Avanço por dente (f_z)	13
2.1.2	Análise visual	14
2.1.3	Sunset laser	15
3	MATERIAL E MÉTODOS	18
3.1	Origem e desdobro	18
3.2	Ensaio de usinagem	18
3.3	Avaliação da qualidade da superfície usinada	19
3.3.1	Avanço por dente	20
3.3.2	Avaliação visual	20
3.3.3	Sunset laser	20
3.4	Análise dos dados	24
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
4.1	Avanço por dente	26
4.2	Análise visual	28
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	37
	REFERÊNCIAS	38

1 INTRODUÇÃO

A qualidade da superfície usinada é fator determinante para os diversos usos da madeira. Madeiras destinadas à confecção de móveis, por exemplo, demandam alta qualidade da superfície. A superfície usinada pode ser qualificada, por meio de metodologias como o avanço por dente, análise visual e o mais comumente utilizado em fábricas de móveis que é o simples tato do encarregado da produção. No entanto, utilizando método empírico como a classificação pelo tato faz com que móveis com baixa qualidade sejam produzidos, mas não alcancem o mercado internacional. No Brasil, o setor moveleiro encontra-se em expansão, no entanto seus produtos não são competitivos no cenário internacional, em razão da baixa qualidade de seus produtos.

Qualidade pode ser definida em função da magnitude do avanço por dente (f_c), que é a marca deixada sobre a superfície, após a usinagem ciclóide (WEING, 2000). A norma ASTM D 1666-11 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM, 2011) é utilizada para classificar superfícies de madeira usinada, a fim de subsidiar sua melhor utilização. Essa classificação possui caráter subjetivo com interferência do avaliador. Assim, observa-se a necessidade de metodologias alternativas capazes de promover, ao processo de qualificação, características de repetitividade e reprodutibilidade.

Estudos utilizando o laser têm sido desenvolvidos com a finalidade de qualificar a superfície usinada. Por ser uma metodologia não destrutiva, o *sunset* laser pode ser empregado no decorrer do processo produtivo sem interferência no produto final.

Objetivou-se, neste trabalho, desenvolver e validar técnica de qualificação de superfícies por meio da quantificação de defeitos, utilizando a

técnica *sunset* laser e comparar com o avanço por dente e com a norma de qualificação visual de superfícies usinadas (ASTM, 2011).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Qualificação da superfície usinada

Quando se trata de madeira usinada, a qualificação do produto se dá por meio da análise da superfície e dos elementos de definição da qualidade. Silva, Braga e Martins (2008) mostraram que há duas vertentes de pesquisadores que conceituam qualidade da superfície usinada, sendo que:

- a) o primeiro grupo conceitua a qualidade apenas pelos valores normativos da usinagem, pelo cálculo do avanço por dente (f_z) ou da profundidade do arco ciclóide (t), sendo expresso em marcas por polegada linear ou em milímetros;
- b) o segundo grupo considera não somente os parâmetros indicados acima, mas também a presença de falhas na superfície, que são geradas em função da estrutura da madeira, pela presença dos diferentes tipos de células, de suas diferentes dimensões e orientações.

2.1.1 Avanço por dente (f_z)

O avanço por dente é representado pela distância entre as pequenas depressões produzidas durante a usinagem, decorrentes dos movimentos circulares da ferramenta, associados ao movimento linear da peça de madeira (Figura 1). Observa-se que quanto menor o valor do avanço por dente, melhor será a qualidade do acabamento.

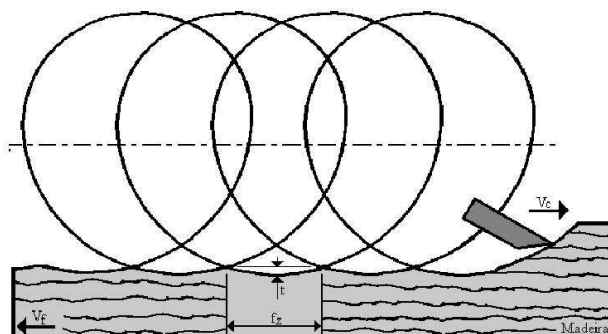


Figura 1 Valores normativos de aplainamento, em que f_z = avanço por dente, t = profundidade do arco ciclóide, V_c = velocidade de corte e V_f = velocidade de avanço

Fonte: Adaptação de Silva (2002) e Weissenstein (2000).

Na Tabela 1, encontra-se a classificação da qualidade dos acabamentos para fresas, desempenho e desengrosso em função dos valores de avanço por dente (SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL - SENAI, 1995).

Tabela 1 Classificação da qualidade do acabamento para fresas, desempenho e desengrosso, em função dos valores do avanço por dente (f_z)

Avanço por dente (f_z), em mm	Qualidade do acabamento
0,3 a 0,8	Fino
0,8 a 2,5	Médio
2,5 a 5,0	Grosso

Fonte: SENAI (1995).

2.1.2 Análise visual

A norma ASTM D 1666-11 (ASTM, 2011) prevê metodologia de qualificação de superfícies usinadas em madeira, cujo princípio é considerar os

defeitos existentes nas superfícies gerados pelo ataque da ferramenta de corte. São atribuídas notas a esses defeitos, pelo fato da necessidade de retrabalho para se obter peças sem defeitos (Tabela 2). A nota 1 corresponde à melhor qualidade da superfície, ela se apresenta isenta de defeito. Já, a nota 5 corresponde a pior qualidade com maior grau de defeitos.

Tabela 2 Notas atribuídas para cada qualidade da superfície de madeira usinada

Notas	Qualidade da superfície da madeira usinada	Classificação da superfície aplainada
1	Superfície isenta de quaisquer defeitos	Excelente (isenta de defeitos)
2	Presença de arrepimento leve a médio	Boa
3	Presença de arrepimento forte e arrancamento leve	Regular
4	Presença de arrepimento forte e arrancamento leve a médio	Ruim
5	Presença de arrancamento forte, independente da presença de arrepimento	Muito Ruim

Fonte: ASTM (2011).

2.1.3 *Sunset* laser

Dentre todas as características do laser, a que permite sua utilização na técnica *sunset* laser é a capacidade de ser uma luz direcionável e concentrada (HECHT, 2001). Essas peculiaridades da luz laser possibilitam sua utilização na qualificação de materiais biológicos.

De acordo com Soragi (2009), o laser vem ganhando espaço como metodologia de qualificação de superfícies de materiais biológicos, por ele ser uma técnica não destrutiva.

De acordo com Rabelo (2000), ao se utilizar a luz laser como fonte de iluminação, consegue-se mais informações sobre o material sob estudo.

Silva, M. et al. (2005), utilizando laser como ferramenta para identificar e classificar textura da superfície de três espécies de madeira nativa, observaram que o laser é eficiente na separação de dois extremos de textura: a textura grossa e a textura fina, representada, respectivamente, pela *Bowdichia virgilioides* (sucupira) e pelo *Balfouro dendronriedelianum* (pau-marfim). Para a textura média, o processo proposto de classificação não foi capaz de diferenciar a textura média da textura grossa. O uso de lasers, para a determinação da orientação das grãs, tem sido empregado em diversos trabalhos (FARIA et al., 2008; HU; TANAKA; OHTANI, 2004; LOWERY, 1966; NOSKOWIAK, 1963).

Souza et al. (2014), utilizando a técnica *sunset* laser na avaliação da zona de ruptura em ensaios de flexão, observaram que, quando aplicado o laser, a ruptura gerada no corpo de prova era melhor visualizada.

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*. Dessa 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. Nesse caso, o melhor resultado foi explicado como sendo possível por causa das sombras produzidas pela iluminação paralela à superfície da madeira. Desse modo, 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

3.1 Origem e desdobro

Utilizou-se madeira de *Corymbia maculata* e *Eucalyptus pilularis*, com 37 anos de idade, provenientes de plantio experimental do Projeto de Desenvolvimento e Pesquisa Florestal (PRODEPEF) do *campus* da Universidade Federal de Lavras (21°14'43 S e 44°59'59 W). A escolha das espécies foi feita mediante material disponível e suas densidades básicas, sendo de 0,604 g*cm⁻³ e 0,530 g*cm⁻³, respectivamente.

As árvores foram colhidas aleatoriamente e coletou-se a primeira tora de cada árvore, que foi enviada à Unidade Experimental de Desdobro e Secagem da Madeira do Departamento de Ciências Florestais da Universidade Federal de Lavras (DCF/UFLA). O processamento primário foi feito com serra de fita simples, utilizando o método de desdobro tangencial. Após o desdobro, as tábuas foram identificadas, refiladas e secas até a umidade de equilíbrio, sendo esta de 14% em média na cidade de Lavras (LIMA; MENDES, 1995). Posterior à secagem, as tábuas foram encaminhadas à câmara climática com temperatura e umidade controladas [T = (20±2)⁰C e UR = (60±5)%] do Laboratório de Ciência e Tecnologia da Madeira (DCF/UFLA).

3.2 Ensaio de usinagem

Inicialmente, confeccionaram-se 75 corpos de prova, com 22 x 110 x 950 mm (espessura x largura x comprimento), que foram aplainados (Figura 2) nas duas faces, totalizando 150 repetições para cada espécie (ASTM, 2011). O ensaio de usinagem foi realizado em plaina desempenadeira, com cabeçote de 105 mm de diâmetro, possuindo três facas novas e com rotação do eixo porta

ferramentas foi de 3600 min^{-1} . A desempenadeira em questão possuía sistema de exaustão. Os corpos de prova foram aplainados com velocidades de avanço de 3, 6, 9, 12, 15 e $18 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ para proporcionar todas as classes de defeito de usinagem apresentados na ASTM D 1666-11 (ASTM, 2011).

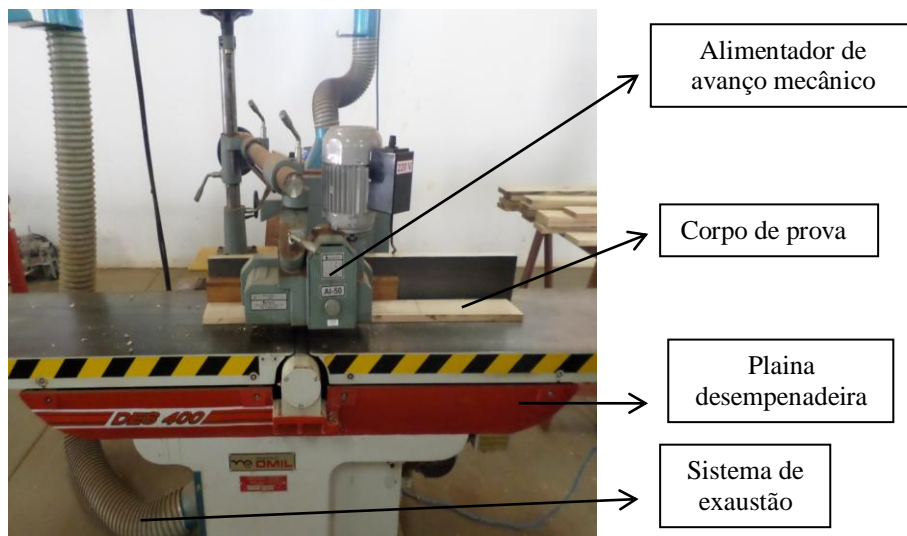


Figura 2 Setup do processo de aplainamento

3.3 Avaliação da qualidade da superfície usinada

Após o ensaio de aplainamento, foram realizadas as qualificações por meio da medição do avanço por dente (f_z), da análise visual (ASTM, 2011) e da avaliação da superfície iluminada por meio do laser de diodo e da abordagem da técnica *sunset* laser, dos corpos de provas. As avaliações da superfície aplainada foram realizadas no interior da câmara climática, sob temperatura e umidade relativa controladas.

3.3.1 Avanço por dente

Nos corpos de prova, foi marcado um ponto de leitura de 30 mm e foram realizadas leituras para verificação do número de marcas (cristas). A partir desses dados, obteve-se o avanço por dente medido.

3.3.2 Avaliação visual

Com base na norma ASTM D 1666-11 (ASTM, 2011), foi realizada a qualificação visual das superfícies usinadas. A fim de diminuir a subjetividade das avaliações, elas foram realizadas por três avaliadores (SILVA, J. et al., 2005), previamente treinados pelo grupo de pesquisa da Ciência e Tecnologia da Madeira (DCF/UFLA). As notas foram comparadas duas a duas e, posteriormente, com a nota dos três avaliadores juntos. Em caso de não consenso sobre a nota final atribuída a cada corpo de prova foi feita a média das notas dos três avaliadores.

3.3.3 *Sunset* laser

Na iluminação dos corpos de prova, foi utilizado um laser de diodo com comprimento de onda de 632 nm e potência de 3 mW. Os corpos de prova foram iluminados em toda sua extensão e a iluminação se deu a 3° de inclinação à superfície usinada. Desse modo, os defeitos apareceram nas imagens iluminadas como pontos sombreados.

Foram feitas imagens de alta resolução (4592 x 2576 *pixels*) das superfícies iluminadas com o laser, assegurando a perpendicularidade entre a superfície do corpo de prova e a câmera, a fim de evitar interferências e sombreamentos na imagem (Figura 3).

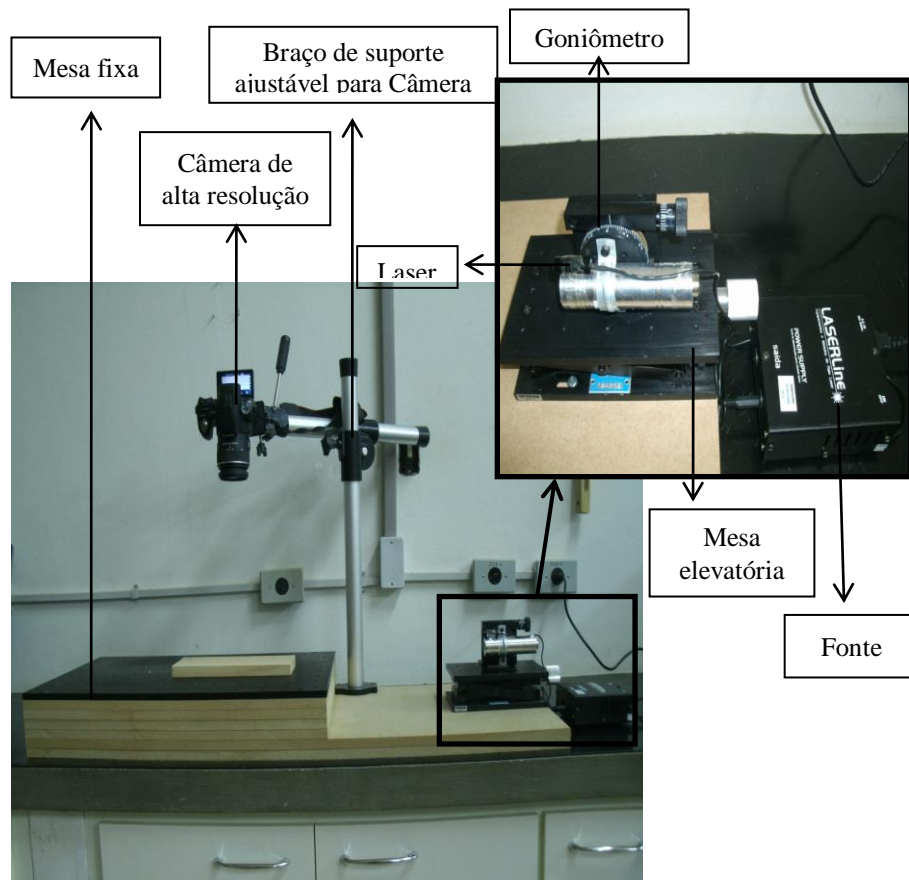


Figura 3 *Setup* para a obtenção das imagens para análise

Depois de identificadas e arquivadas, as imagens foram analisadas por meio do *software Image J*[®] (RASBAND, 1997). A avaliação da superfície foi feita de acordo com a área do defeito no corpo de prova, sendo que quanto menores as áreas defeituosas, melhores as superfícies usinadas. As imagens no formato RGB color (Red-Green-Blue color) foram transformadas em imagens em escala de cinza, de 8 bit e, posteriormente, foi feita a binarização da imagem, a fim de compreender os valores de pixel entre 0 e 40, isso foi necessário para

não contabilizar como defeitos as sombras geradas pelas cristas do avanço por dente (Figura 4).

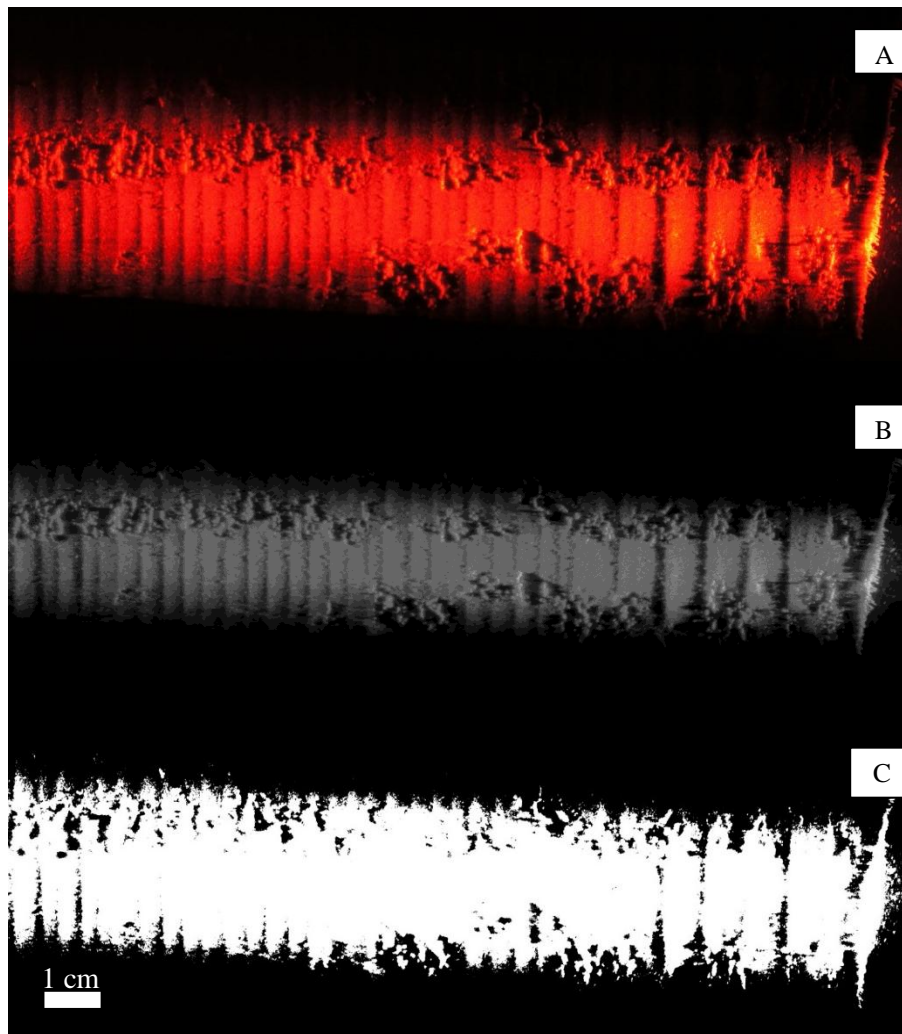


Figura 4 Imagens de superfícies iluminadas com o laser de diodo, A) Imagem original, formato RGB color. B) Imagem em escala de cinza (8 bit). C) Imagem binarizada

A quantificação da área do defeito foi realizada por meio de polígonos de mesma ordem de grandeza ($450 \times 450 \text{ pixels}$), ao redor da região de interesse (roi) que foi definida em três pontos no corpo de prova. A roi foi estabelecida em dois pontos distantes da extremidade em 150 pixels e um ponto central. (Figura 5). No interior dos polígonos gerados, foi analisada a porcentagem de *pixels* de valores iguais a zero que aparecem na cor preta. Esses *pixels* correspondem ao sombreamento dos defeitos ocorridos durante o processamento da madeira.

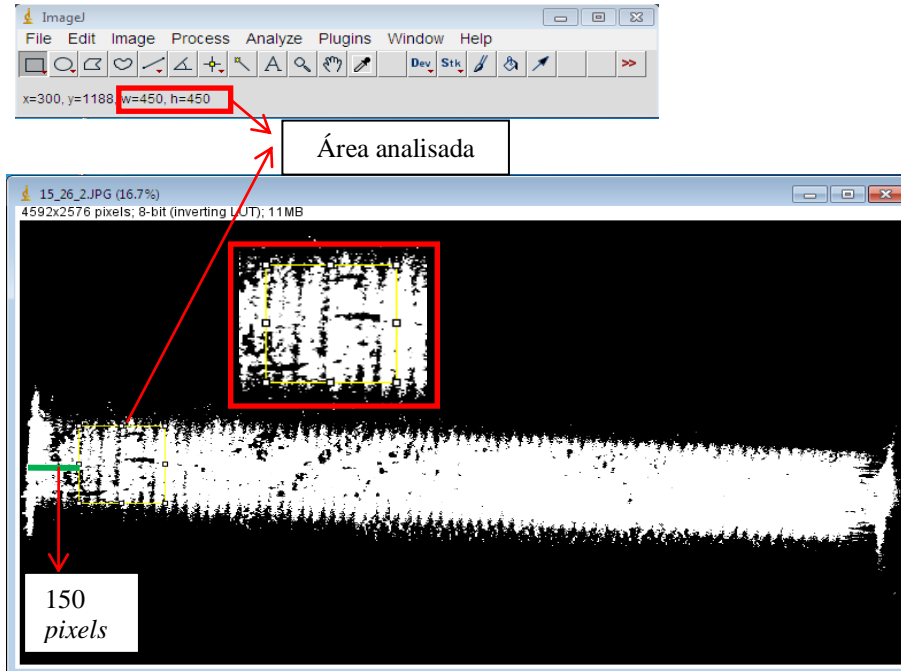


Figura 5 Demonstração da área de análise do defeito

A classificação da superfície usinada foi feita considerando o defeito mais severo encontrado na superfície do corpo de prova. No entanto, pode haver algumas partes do corpo de prova classificados com qualidade melhor que a

classificada para o corpo de prova como um todo. Para evitar superestimar a área do defeito pelo *sunset* laser, foi feita seleção dos dados, de modo que as áreas do defeito que não representavam a classificação visual fossem desconsideradas da média geral.

3.4 Análise dos dados

A análise estatística utilizada foi a regressão linear simples entre os valores de percentagem da área do defeito e as notas atribuídas pela avaliação visual e os valores médios para o avanço por dente medido.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na análise geral dos dados da qualidade da superfície usinada das madeiras de *C. maculata* e *E. saligna*, conforme classificação da ASTM D 1666 - 11 (ASTM, 2011), observou-se que as percentagens dos corpos de prova foram de 3%, 6%, 40%, 30% e 21%, para as notas 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente. É importante salientar que, quanto maior a nota apresentada, pior é a qualidade da superfície usinada. Maior frequência de classe de defeito foi encontrada em 118 corpos de prova que apresentaram presença de arrepiamento forte e arrancamento leve (nota 3), enquanto apenas 8 corpos de provas apresentaram-se isento de defeitos (nota 1). Conforme Silva et al. (2009), pode-se dizer que 145 corpos de prova foram considerados de qualidade satisfatória (notas 1, 2 e 3) e 151 corpos de prova considerados de qualidade não satisfatória (notas 4 e 5).

Os valores médios do avanço por dente medido (f_z medido) e da área dos defeitos para as cinco classes de defeito proposta pela ASTM D 1666 – 11 (ASTM, 2011) encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3 Valores médios de avanço por dente medido e da área dos defeitos

Notas	Valores Médios de	
	Avanço por dente (f_z), em mm	Área do defeito (%)
1	1,73	0,43
2	2,12	5,74
3	2,39	12,74
4	2,69	21,98
5	3,08	51,82

4.1 Avanço por dente

O avanço por dente medido é considerado de difícil visualização a olho nu, quando as madeiras são usinadas com baixa velocidade de avanço e, ou alta velocidade de corte, isso significa que as distâncias das marcas deixadas pelo dente da ferramenta de corte estão muito próximas. Espécies diferentes, usinadas sob mesmas condições de velocidades de avanço e de corte, são qualificadas, segundo classificação proposta por SENAI (1995) como semelhantes. No entanto, quando estas são qualificadas conforme classificação da ASTM D 1666 – 11 (ASTM, 2011), pode haver variação da qualidade e isso é decorrente das características anatômicas e físicas da madeira, pois essas características podem apresentar defeitos na madeira. Observando os dados de avanço por dente, notou-se que 49% dos corpos de prova foram classificados como qualidade mediana para as notas 1, 2 e 3. Já, o restante foi classificado com qualidade grosseira para as notas 4 e 5 (SENAI, 1995).

Durante o processo de medição do avanço por dente, não foi possível realizar a medição de 56 corpos de prova, em decorrência da pequena distância entre as cristas e, nesses casos, observou-se que a qualidade da superfície era fina (SENAI, 1995). Em 5% dos corpos de prova não foi possível realizar a medição do avanço por dente, em razão do arrancamento das fibras cobrirem toda a extensão do corpo de prova e, conforme classificação sugerida pelo SENAI (1995), essas madeiras foram classificadas como de acabamento grosseiro. Silva et al. (2009) observaram que em corpos de prova aplainados com velocidade de avanço de $3 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ e rotação de 4470 min^{-1} não foi possível visualizar o avanço por dente, em razão da pequena magnitude das distâncias entre as cristas.

Assim, foi estabelecida a regressão linear simples para avaliar a relação entre as áreas dos defeitos iluminados com o laser de diodo e a distância em mm do avanço por dente (Figura 6).

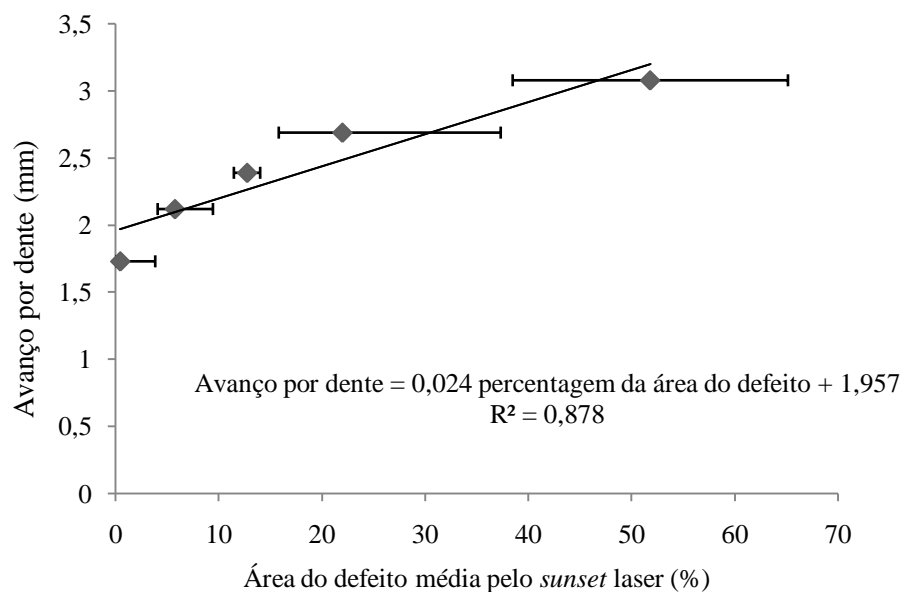


Figura 6 Relação entre o avanço por dente e a área do defeito em superfícies processadas mecanicamente medida pelo *sunset* laser

A relação entre o avanço por dente e a percentagem da área do defeito apresentou forte dependência ($R^2 = 0,878$). O *sunset* laser mostrou-se capaz de qualificar a madeira mesmo em situações em que a qualificação não foi possível pelo olho humano, uma vez que a maior variação encontrada no avanço por dente medido foi de 0,39 mm (nota 4 subtraída da nota 5), enquanto que a variação mínima da percentagem da área do defeito foi de 5,31% (nota 1 subtraída da nota 2).

Mesmo sem ter feito a análise da colorimetria das espécies, a diferença visual subjetiva de coloração entre elas foi apresentada como nítida. A madeira

da *C. maculata* foi amarela e do *E. saligna* foi vermelha. Observou-se que para a espécie *C. maculata* houve maior dificuldade na visualização do avanço por dente, principalmente quando a distância entre as cristas era pequena. Isso foi decorrente do baixo contraste entre a cor da madeira e as marcas de giz utilizado para realçar as cristas do avanço por dente.

4.2 Análise visual

A qualificação visual dos defeitos originados pelo processo de usinagem da madeira é subjetiva e de difícil aquisição. Para notas consecutivas, o grau de dificuldade em separá-las visualmente é ainda maior, pois a característica utilizada para distingui-las é sutil (Figuras 7, 8, 9, 10 e 11). Entretanto, com o auxílio do laser, essas diferenças tornaram-se mais evidentes. Analisando os dados, observou-se que os corpos de prova classificados como nota 1 e nota 2 tiveram menor diferença de percentagem da área do defeito medida pelo *sunset* laser, no entanto, visualmente, a maior dificuldade em classificar ocorre para notas 3 e 4, que obtiveram diferença da área do defeito de quase 10% (TABELA 4).

Tabela 4 Valores máximos e mínimos da área do defeito medida pelo *sunset* laser para as cinco classes de defeito

Notas	Área do defeito (%)	
	Mínimo	Máximo
1	0	3,84
2	4,08	9,43
3	11,46	14,01
4	15,81	37,32
5	38,48	65,15



Figura 7 Corpo de prova qualificado de acordo com a classificação da ASTM D 1666-11 (ASTM, 2011) como excelente (nota 1)



Figura 8 Corpo de prova qualificado de acordo com a classificação da ASTM D 1666-11 (ASTM, 2011) como boa qualidade da superfície aplainada (nota 2)



Figura 9 Corpo de prova qualificado de acordo com a classificação da ASTM D 1666-11 (ASTM, 2011) como qualidade da superfície aplainada regular (nota 3)



Figura 10 Corpo de prova qualificado de acordo com a classificação da ASTM D 1666-11 (ASTM, 2011) como qualidade da superfície aplainada ruim (nota 4)



Figura 11 Corpo de prova qualificado de acordo com a classificação da ASTM D 1666-11 (ASTM, 2011) como qualidade da superfície aplainada muito ruim (nota 5)

A maior dificuldade encontrada na classificação visual foi em distinguir as notas 3 e 4, pois a única diferença entre elas foi a intensidade do arrancamento das fibras, sendo arrancamento leve e arrancamento leve a médio, para as notas 3 e 4, respectivamente. Silva et al. (2009) sugeriram que, para a classificação da superfície usinada em madeiras, as peças poderão ser separadas em apenas duas categorias, sendo satisfatória e não satisfatória.

Analisando os dados, observou-se que 70% dos corpos de prova foram classificados como notas 3 e 4, o que significa que, em 208 corpos de prova houve dificuldade em classificar sua superfície usinada em regular (nota 3) ou ruim (nota 4). No entanto, quando os corpos de prova são iluminados pelo *sunset* laser (Figura 12), as características que os classificam em excelente a muito ruim foram identificadas com mais facilidade do que a olho nu, como prevê a ASTM D 1666 – 11 (ASTM, 2011).

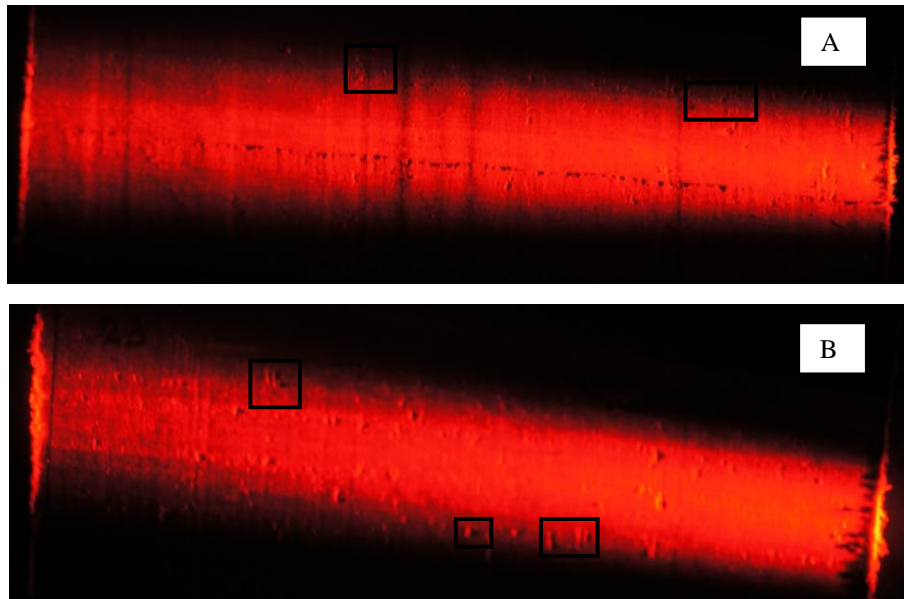


Figura 12 Corpos de prova iluminados pelo *sunset* laser e qualificados por meio da classificação da ASTM D 1666 11 (ASTM, 2011) A) corpo de prova qualificado como nota 3 e classificado com regular, nos detalhes destacados estão os arrancamentos leves B) corpo de prova qualificado como nota 4 e classificado com ruim, nos detalhes destacados estão os arrancamentos leves a médios

Observa-se que, quando os corpos de prova não são iluminados pelo *sunset* laser (Figuras 9 e 10), é difícil para o avaliador definir somente a olho nu a intensidade do arrancamento da fibra. Os corpos de prova, quando submetidos à iluminação com o *sunset* laser (Figura 12A e B), foram qualificados mais facilmente e a intensidade do arrancamento das fibras foi melhor definida em função da área do defeito, que é gerada utilizando o *software* ImageJ ou, até mesmo, visualmente, pela coloração do pixel na região de defeito.

A luminosidade na região do defeito é menor, pois os defeitos são depressões nos corpos de prova e, sendo assim, o laser não os ilumina. Os corpos de prova classificados como nota 4 apresentaram maior intensidade de arrancamento das fibras do que os classificados como nota 3, portanto maior é a

área que não recebe iluminação do laser. Desse modo, os corpos de prova classificados como nota 4 contêm mais pixels com valores 0 do que os classificados como nota 3.

A relação entre a área do defeito e a nota atribuída aos corpos de prova apresentam-se por meio de regressão linear simples na Figura 13.

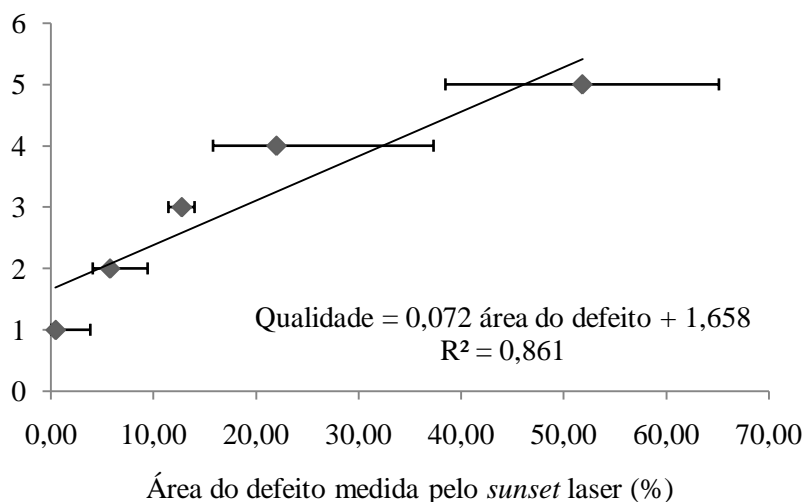


Figura 13 Relação entre a qualidade e a percentagem da área do defeito medida pelo *sunset* laser em superfícies processadas mecanicamente

A forte relação entre a nota atribuída e a percentagem da área do defeito ($R^2 = 0,861$), aliados à dificuldade em atribuir notas às superfícies, por meio da análise visual, mostrou que a metodologia do *sunset* laser foi promissora para qualificar a superfície usinada. Uma característica importante desse método é a ausência da subjetividade na classificação de grupos de qualidade consecutivos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

- a) O uso da técnica *sunset* laser mostrou-se capaz de qualificar a superfície usinada, com caráter de reprodutibilidade;
- b) A técnica *sunset* laser pode ser utilizada como metodologia alternativa às técnicas de qualificação da análise visual e do avanço por dente;
- c) A técnica *sunset* laser corroborou com os resultados encontrados na literatura de que, quanto maior o avanço por dente pior é a qualidade da superfície usinada;
- d) *C. maculata* e *E. saligna* se comportaram semelhantes, durante o processamento de suas madeiras, apresentando qualidades em todas as cinco classes de defeito;
- e) A coloração das madeiras não interferiu na avaliação visual. No entanto, o avanço por dente foi de difícil visualização na madeira de *C. maculata*, de coloração clara.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 1666-11**: standard method for conducting machining tests of wood and wood base materials. Philadelphia, 2011. 20 p.

FARIA, R. O. et al. Reliability of wood grain orientation measurements using laser illumination. **Biosystems Engineering**, London, v. 100, n. 4, p. 479-483, Aug. 2008.

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

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

LIMA, J. T.; MENDES, L. M. Estimativa da umidade de equilíbrio para madeiras em trinta e duas cidades de Minas Gerais. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 19, n. 2, p. 272-276, 1995.

LOWERY, D. P. A spiral grain classification system and its application. **Forest Products Journal**, Madison, v. 16, n. 1, p. 47-50, 1966.

NOSKOWIAK, A. F. Spiral grain in trees: a review. **Forest Products Journal**, Madison, v. 13, p. 266-275, 1963.

RABELO, G. F. **Avaliação da aplicação do “speckle” dinâmico no monitoramento da qualidade da laranja**. 2000. 149 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

RASBAND, W. S. **Image J: image processing and analysis in Java**. Bethesda: U.S. National Institutes of Health, 1997. Disponível em: <<http://rsb.info.nih.gov/ij/>>. Acesso em: 10 nov. 2014.

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL. **Acabador de móveis**. Ubá: CFP/JAGS, 1995. 29 p.

SILVA, J. R. M. **Relações da usinabilidade e aderência do verniz com as propriedades fundamentais do *Eucalyptus Grandis Hill Ex. Maiden***. 2002. 179 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

SILVA, J. R. M.; BRAGA, P. P. C.; MARTINS, M. Identificação de parâmetros de rugosidade para qualificação de pisos de *Eucalyptus grandis*. **Revista da Madeira**, Curitiba, n. 65, ago. 2008. Disponível em: <http://remade.com.br/br/artigos_tecnicos.php?sub=63&categoria=Esp%E9cies&subcategoria=Eucalipto>. Acesso em: 10 nov. 2014.

SILVA, J. R. M. et al. Influência da morfologia das fibras na usinabilidade da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 29, n. 3, p. 479-487, jul./ago. 2005.

SILVA, J. R. M. et al. 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. et al. 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, M. R. et al. Interação da luz laser para a avaliação da textura de madeiras nativas e de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden laser light interaction for texture evaluation of native woods and *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 15, n. 2, p. 167-175, 2005.

SORAGI, L. C. **Qualidade de superfícies usinadas em madeira de *Toonaciliata M. Roem.*** Lavras: UFLA, 2009. 61 p.

SOUZA, T. M. et al. Non-destructive technology associating PIV and Sunset laser to create wood deformation maps and predict failure. **Biosystems Engineering**, London, v. 126, p. 109-116, Oct. 2014.

WEING, A. **Oberflächenqualität**. Werkzeug: Präsentation Hydrotechnik, 2000. 1 CD-ROM.

WEISSENSTEIN, C. Usinagem, condições da ferramenta decide bom acabamento. **Revista da Madeira**, Curitiba, n. 57, p. 30-32, 2000.