

JORGE ARTUR SANTOS

**USO DO MÉTODO OPARÁ PARA DETERMINAÇÃO DA
QUALIDADE DA SUPERFÍCIE DA MADEIRA**

SÃO CRISTÓVÃO – SE
2025

Jorge Artur Santos

**USO DO MÉTODO OPARÁ PARA DETERMINAÇÃO DA QUALIDADE DA
SUPERFÍCIE DA MADEIRA**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Departamento de Ciências
Florestais, Universidade Federal de
Sergipe, como requisito parcial para
obtenção do título de Engenheiro
Florestal.

São Cristóvão – SE
2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE - UFS
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS APLICADAS - CCAA
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS FLORESTAIS - DCF

USO DO MÉTODO OPARÁ PARA DETERMINAÇÃO DA QUALIDADE DA SUPERFÍCIE DA MADEIRA

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Departamento de Ciências
Florestais, Universidade Federal de
Sergipe, como requisito parcial para
obtenção do título de Engenheiro
Florestal.

APROVADO: 22 de dezembro de 2025

ORIENTADO: Jorge Artur Santos

Profa. Dra. Anna Carolina de Almeida Andrade

Prof. Dr. Antônio Américo Cardoso Júnior

Profa. Dra. Márcia Rodrigues de Moura Fernandes

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal de Sergipe por fornecer educação pública de qualidade e acesso à pesquisa, ensino e extensão de maneira acessível durante todos os anos da minha graduação. Agradeço ao LUPM/UFS e todos os seus funcionários ao apoio, aos aprendizados e por ceder seus espaços profissionais. Gratidão ao LABSEM, em especial ao técnico Franklin Souza pela disponibilidade, paciência e aprendizados. Agradeço ao PIBIC – PROGRAD por todo o apoio acadêmico financeiro e educacional prestado nas atividades complementares durante todo o curso.

Agradeço aos professores convidados para a banca, Prof. Dr. Antônio Américo Cardoso Júnior e Profa. Dra. Márcia Rodrigues de Moura Fernandes, por sua disponibilidade e oportunidade para compartilhar seus conhecimentos, incrementando mais o processo de aprendizagem durante o curso e para o mercado profissional.

Gratidão aos professores do DCF que me acompanharam em toda essa jornada de aprendizagem, conhecimento, desenvolvimento pessoal e profissional, desde os pontos altos até mesmo nos pontos baixos.

Em especial, à minha orientadora, professora, amiga, inspiração pessoal e profissional, Anna Carolina de Almeida Andrade. Muito obrigado por acreditar num menino tímido na sala de aula, agradeço por me incentivar em cada momento desde antes de sua orientação, a todos os conselhos e puxões de orelhas necessários e mais ainda por ver e ouvir além do estudante: por me ver e ouvir como pessoa. Nunca vou te esquecer, espero ser um profissional e uma pessoa tão boa quanto a senhora.

Gratidão eterna, incalculável e inacabável a meus pais, Elisângela Santos e Jorge Luiz dos Santos, que foram meus professores bem antes de conseguirem o diploma para dar aulas, que cresceram na escola da vida com todas as dificuldades dos aprendizados cotidianos, mas que nunca desistiram de seus objetivos, sempre mantiveram a família por perto, unida e calorosa e, acima de tudo, nunca recusaram um momento de ensinamento, transmissão de conhecimento e carinho, com toda a paciência possível, seja nas salas de aula, nas ruas, no conforto de casa e, principalmente, para o primeiro fihinho que sempre aprontava e que espera se tornam um orgulho para vocês. Muito obrigado, eu amo vocês.

Às minhas irmãs, só tenho sentimentos de felicidade, saudade e orgulho, por poder acompanhar todas as fases de seus crescimentos, amadurecimento e conquistas. Os momentos difíceis prefiro deixar para ser resolvido como sempre nos foi ensinado em casa por toda a família: um bom abraço, um choro para aliviar e várias risadas para cicatrizar. Muito obrigado Maria Eloísa Santos e Clara Sofia Santos, meus dias são mais felizes desde

que vocês nasceram e mais radiantes por ver o brilho de vocês em todas as áreas que vocês tem a coragem de se aventurar. Amo muito vocês, minhas irmãs.

À minha namorada, melhor amiga, parceira de todas as situações e companhia daqui para frente na vida, Mariane Silva. É engraçado e até clichê, mas nossa vida parece que toma um rumo certo e mais bonito quando encontramos alguém especial que aceita nosso amor e que também nos ama. Muito obrigado por todos os momentos, todos os aprendizados, todos os choros, risos e momentos marcantes juntos, todas as fotos, cartas, viagens, dias corridos e tranquilos, comidas feitas em conjuntos, video games jogados, filmes assistidos... Muito obrigado pelos últimos 3 anos e vamos fazer de tudo para que venham muitos e muitos mais 3 anos, hoje na graduação, num futuro próximo na pós-graduação e em um sonho bom que vai se tornar realidade, numa vida inteira de companheirismo, respeito e, acima de tudo, muito amor. Ao seu lado os dias são mais belos, as músicas são mais marcantes, as comidas têm sabores fantásticos e todo momento fica gravado com a marca d'água da felicidade em meu coração. Amo muito você, meu amor.

Agradeço a todos os meus tios, tias, primos e primas, que são tantos que não dá para nomear. Do mesmo modo são os sentimentos bons e marcantes ao passar o menor do tempo em família, são tantos e tantos que não dá contar e explicar, somente sentir e aproveitar cada segundo. Muito obrigado por todos os momentos da infância, adolescência e fase adulta da minha vida, todos os meus sonhos, inspirações, saudades e maiores alegrias vêm de cada um de vocês. Cada um de vocês tem lugar especial em minhas memórias e em meu coração. Amo todos vocês, obrigado por tudo.

Minha sincera gratidão e um abraço que sempre deixei de entregar a todos os meus amigos durante minha vida, em especial aos meus grandes e melhores amigos desde a infância/adolescência: Marlon, Victor, Wallysson, Josen, Eto, Jorge, Juninho e Italo, que sempre me acompanharam desde as ruas de Penedo em todas as brincadeiras, jogatinas, lanches, banhos no rio e confusões durante minha infância/adolescência e por toda a companhia, diversão, conselhos e distrações na vida adulta, que está sendo à distância por motivo de crescimento pessoal e profissional, mas que só desperta mais felicidade e orgulho, pois uma das maiores felicidades da nossa vida é ver quem a gente ama também crescer. Estávamos juntos ontem, estamos juntos hoje e vamos estar sempre juntos sempre, meus irmãos que eu nunca pensei em ter, mas que fico feliz em ter encontrado durante a vida.

Angela Maria dos Santos e Coralina Silva Santos (*in memoriam*).

SUMÁRIO

1.	82.	92.1.
	92.2.	102.3.
	102.4.	102.5.
	113.	123.1.
	123.2.	133.3.
	173.3.1 MÉTODO OPARÁ	174.
	234.1.	244.2.
	264.3.	284.4.
	295.	
	326.	
	TRABALHOS FUTUROS	Erro! Indicador não definido.

RESUMO

O setor moveleiro encontra-se em expansão, com destaque para a produção de mobiliário a base de madeira sólida, a qual demanda matérias-primas com elevada qualidade superficial. A qualificação das madeiras destinadas à fabricação de móveis é realizada, majoritariamente, em micro e pequenas empresas, por meio de avaliações sensoriais subjetivas, baseadas principalmente no tato e na experiência do operador, o que dificulta a padronização dos critérios de qualidade, e reduz a competitividade do setor no que se refere ao atendimento de normas técnicas para inserção em mercados externos. Assim, o objetivo deste estudo foi propor uma tecnologia de baixo custo capaz de avaliar e qualificar a superfície de madeiras usinadas, visando à sua aplicação em micro e pequenas indústrias do setor moveleiro. Para tanto, foi proposto o uso de imagens associadas a técnicas de processamento digital para análise de nove espécies de madeira, incluindo *Pinus sp.*, *Astronium lecointei* (Muiracatiara) e *Eucalyptus sp.*, cada uma representada por três corpos de prova, os quais foram condicionados a três diferentes tipos de umidade: absolutamente seca (AS), parcialmente úmida (PU) e submersa (SUB). As imagens foram obtidas por meio de um digitalizador e posteriormente processadas utilizando o software livre ImageJ. Os resultados derivados do processamento digital de imagens foram comparados com técnicas consolidadas de qualificação da superfície da madeira, por meio de correlação de Pearson, incluindo a análise visual conforme a norma ASTM D1666-11, a técnica *sunset laser* e os parâmetros de rugosidade superficial Ra, Rq e Rz. A análise dos histogramas de níveis de cinza indicou que a madeira de Muiracatiara apresentou menor variação na média de pixels, com 97,105 pixels, seguida da madeira de Eucalipto com 148,801 pixels, enquanto a madeira de Pinus apresentou a maior variação média, com 166,910 pixels, indicando pior uniformidade superficial entre as espécies avaliadas. A metodologia Opará, proposta visando redução de custo operacional e eficácia na determinação da qualidade superficial da madeira usinada obteve forte relação ($r = 0,892$) quando comparada com a análise visual e correlação moderada ($r = 0,672$) quando comparada com a técnica *sunset laser* o que sugere ser uma metodologia inovadora e assertiva na qualificação de superfícies. Concluiu-se que a metodologia baseada em histograma pode ser empregada como alternativa às técnicas de análise visual (ASTM D 1666-11), uma vez que apresenta forte correlação positiva com esse método. Em relação ao *sunset laser*, embora a correlação observada seja positiva moderada, a análise por histograma apresenta vantagens, pois permite a avaliação da totalidade da superfície analisada, diferentemente do *sunset laser*, que se restringe a áreas pontuais da amostra.

1. INTRODUÇÃO

A madeira é um tecido orgânico de origem vegetal, caracterizado por sua heterogeneidade, anisotropia, e higroscopicidade, propriedades essas que a tornam um material único e objeto de utilização para diversas finalidades. Diante disso, estudos voltados à compreensão de seu comportamento e otimização de seu uso garantem seu emprego racional (MADY, 2017).

Entre os diversos usos da madeira, o setor moveleiro desempenha papel de destaque na cadeia produtiva da madeira serrada. De acordo com a Associação Brasileira das Indústrias do Mobiliário (ABIMÓVEL) e com dados do Relatório Setorial da Indústria de Móveis no Brasil, no ano de 2024 foram produzidas mais de 439,9 milhões de peças de móveis no país, com exportações que totalizaram US\$ 763,023 milhões, gerando 282,724 mil trabalhadores envolvidos direta e indiretamente na cadeia produtiva.

Diante dessa relevância econômica e social, é necessário um controle nos processos produtivos para a obtenção de um produto final com padrão de qualidade adequada. Uma das principais métricas para avaliação do produto final refere-se à qualidade da superfície da madeira, parâmetro influenciado por características e propriedades físicas, químicas, mecânicas e anatômicas da madeira (PEREIRA, 2017).

O conhecimento das propriedades da madeira é fundamental para se obter produtos com parâmetros adequados e para previsão do seu comportamento durante o processamento garantindo maior controle no processo de usinagem. As características físicas da madeira exercem influência na qualidade da superfície e na resistência ao corte. Assim, informações sobre o comportamento da madeira durante a usinagem é uma necessidade ligada ao processamento industrial, principalmente por razões econômicas e produtivas. Máquinas, ferramentas e operadores envolvidos no processamento da madeira demandam informações confiáveis sobre os principais fatores que afetam o processo de usinagem (EYMA et al., 2004). A qualidade da superfície da madeira representa um fator crucial para sua aplicação industrial, especialmente no uso da madeira sólida, exercendo influências em etapas como revestimento, adesivagem e usinagem. Propriedades como rugosidade, estabilidade dimensional e presença de defeitos superficiais interferem diretamente na performance do material, sendo determinantes para sua viabilidade em diferentes finalidades, desde o uso estrutural até a fabricação de produtos acabados (SILVA et al., 2006; ANDRADE et al., 2016). A avaliação da qualidade superficial da madeira pode ser realizada por diferentes métodos, como a análise visual, a medição da rugosidade e a técnica *sunset* laser. No entanto, durante o processo de caracterização da superfície usinada, o uso de metodologias empíricas

de baixa precisão, como a análise visual, pode acarretar problemas devido à falta de padronização entre avaliadores (OLIVEIRA et al., 2021).

Embora, a avaliação da rugosidade seja utilizada e funcional para o estudo da superfície da madeira após seu processamento mecânico, o elevado custo dos equipamentos pode ser um entrave à sua implementação em micro e pequenas indústrias moveleiras.

Assim, o presente estudo teve como objetivo implementar uma tecnologia inovadora, de baixo custo e capaz de avaliar e qualificar a superfície da madeira usinada, visando seu emprego em micro e pequenas indústrias do setor moveleiro.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. FATORES QUE INFLUENCIAM A QUALIDADE DA SUPERFÍCIE DA MADEIRA

As propriedades físicas da madeira são as principais características que influenciam no corte e, conseqüentemente, a qualidade da superfície usinada. Entre essas propriedades, a umidade possui influência na qualidade da superfície, resistência ao corte e energia requerida para o processamento (ANDRADE et al., 2019). Os mesmos autores relatam que a umidade da madeira possui relação inversamente proporcional com a energia específica de corte, ou seja, maiores teores de umidade facilitam o processamento mecânico da madeira. Esse comportamento pode ser confirmado por KOCH (1964), que ressalta que a umidade na madeira influencia o processo de usinagem, uma vez que o aumento do teor de umidade promove a redução da resistência mecânica da madeira. Essa relação demonstra que, para a usinagem da madeira, é preferível adotar um valor de umidade fixo, preferencialmente próximo à umidade de equilíbrio.

Segundo KIVIMAA (1950, apud LUCAS FILHO, 2004), a anisotropia da madeira é umas das características que mais influencia as propriedades físicas e mecânicas nos planos transversal, tangencial e radial. Em seu estudo, foi constatado que quando o corte é efetuado na direção dos raios, as forças de corte geradas são aproximadamente 12% superiores às aquelas observadas quando o corte ocorre perpendicularmente a essa direção.

Além disso, aspectos anatômicos da madeira exercem influência direta sobre a qualidade da superfície usinada. SILVA et al. (1999) constataram que, durante o processo de usinagem, as fibras raramente são cortadas, resultando em defeitos e falhas ao final do processo de usinagem, principalmente devido à grande dimensão dos gumes de corte das ferramentas em relação às dimensões das fibras da madeira, o que favorece o arrancamento e a raspagem das fibras na superfície da madeira.

A presença de grã irregular compromete a qualidade da superfície usinada, uma vez

que o corte realizado em sentido contrário à direção das fibras, tornam as superfícies ásperas. Ademais, elementos como células oleíferas, canais celulares e resinas, dificultam o processo de desdobramento e beneficiamento da madeira, se aderindo as ferramentas de corte e causando danos à superfície usinada (SILVA et al., 1999).

2.2. RUGOSIDADE

A rugosidade está relacionada com o comportamento do material em relação a sua qualidade do deslizamento (atrito), a resistência à corrosão e ao desgaste, a resistência quanto ao escoamento de fluídos e lubrificantes, a qualidade de aderência, a resistência à flexão e à fadiga, a condução térmica e elétrica, a vedação estática e dinâmica, ao conforto e estética, tornando-se uma característica de grande importância para a indústria (WHITEHOUSE, 1994).

A rugosidade superficial da madeira é uma importante característica para a qualidade da superfície usinada, influenciando diretamente na qualidade final dos produtos de madeira que são fabricados (CUNHA et al., 2023)

A avaliação da rugosidade em materiais é realizada segundo normas técnicas, como a NBR ISO 4287 (2002) e a 4288 (2008), que definem a avaliação da rugosidade de um perfil por meio de parâmetros denominados R's (Ra, Rq, Rk entre outros). Ao se identificar o perfil da superfície, as irregularidades representadas por picos e vales, são quantificadas pela sua altura e espaçamento. Esses valores são utilizados para o cálculo dos parâmetros e tornam funcional o estudo da rugosidade promovendo a compreensão dos perfis (MAHR, 1999).

2.3. ANÁLISE VISUAL – NORMA ASTM D 1666-11

Esse método consiste na análise de forma subjetiva e visual da superfície da madeira após seu processamento mecânico. Dessa forma, a classificação baseada na avaliação visual se torna imprecisa, uma vez que ocorre elevada variação nos resultados de classificação em função da ocorrência de variação na sensibilidade de cada avaliador.

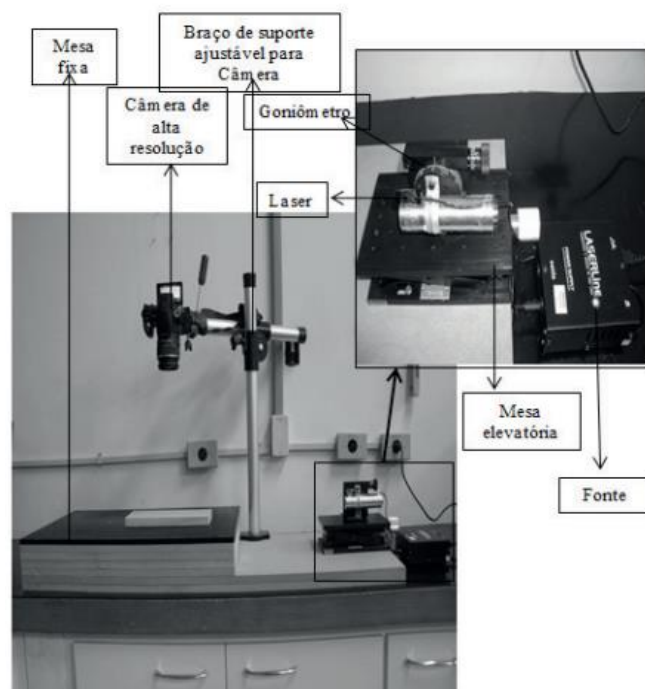
Após a análise visual, é feita a classificação da qualidade da superfície usinada utilizando a norma ASTM D1666-87 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM, 1995). Esta metodologia avalia as fibras da madeira quanto ao arrepiamento e arrancamento, classificando-os em níveis que variam de leve a forte, e atribui notas que classifica a superfície usinada quanto aos defeitos existentes visíveis a olho nu, resultantes do ataque das ferramentas de corte, identificando a necessidade de retrabalho da peça para se obter um acabamento adequado.

2.4. *SUNSET LASER*

Para evitar imprecisões do método de avaliação visual descrito no item 2.3, anteriormente, a técnica do *sunset* laser foi desenvolvida para se estabelecer classificações da superfície usinada de forma mais objetiva, além de possibilitar a repetição das medições quantas vezes necessárias, assegurando uma melhor avaliação, confiabilidade e precisão dos resultados.

ANDRADE et al. (2016) descrevem a metodologia dessa técnica, consistindo na iluminação da superfície da madeira utilizando a luz laser com baixa inclinação (3°), garantindo que o feixe de luz fique quase paralelo à superfície. O feixe de luz deve cobrir toda a extensão da face do corpo de prova. Em seguida são feitas imagens com câmera de alta resolução das superfícies iluminadas pelo laser (Figura 4). Os defeitos superficiais se mostram como imagens de áreas sombreadas, isto é, com tons mais escuros. A análise é realizada pela medição da área do defeito ocorrido durante o processo de usinagem.

FIGURA 4 - Setup para obtenção das imagens para análise.



FONTE: ANDRADE et al. (2016).

2.5. MÉTODO OPARÁ

O ImageJ é um software para análise e processamento de imagens, tendo como seu principal desenvolvedor Wayne Rasband, que projetou o software no National Institute of Mental Health, nos Estados Unidos. O programa é escrito em linguagem Java e possui código aberto. O programa suporta imagens com profundidade de 8, 16 e 32 bits, e gera resultados como área, orientação, perímetro, entre outras métricas, a partir de cálculos baseados na contagem de pixels. Além disso, o software permite o processamento de

diversos formatos de imagens, como TIFF, GIF, JPEG, BMP, DICOM e FITS (SCHNEIDER et al., 2012).

3. MATERIAL E MÉTODOS

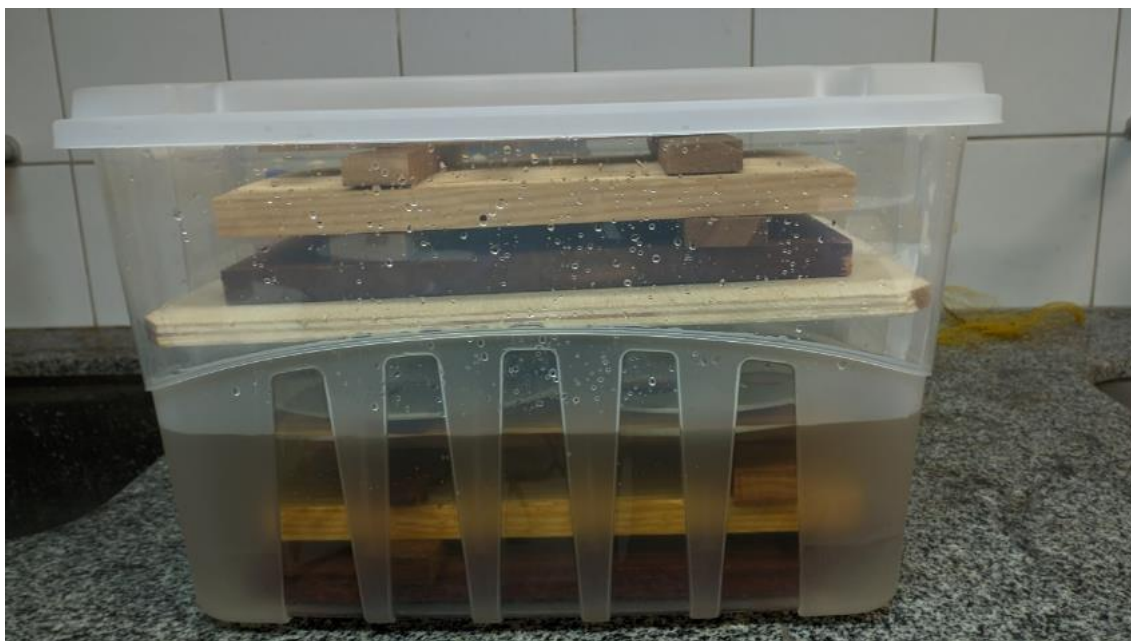
3.1. AMBIENTAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

O experimento foi realizado no Laboratório de Usinagem e Produção de Móveis (LUPM) e no Laboratório de Análise Qualitativa da Madeira (LAQM), vinculados ao Departamento de Ciências Florestais da Universidade Federal de Sergipe (DCF/UFS). Foram utilizados nove corpos de prova, distribuídos em três diferentes espécies de madeira: *Pinus sp.*, *Astronium lecointei* (Muiracatiara) e *Eucalyptus sp.*, resultando no total de três amostras para cada espécie.

Os corpos de prova foram submetidos a três diferentes condições de umidade: absolutamente seca (AS), parcialmente úmida (PU) e submersa (SUB). As condições parcialmente úmida e submersa foram conduzidas em ambiente controlado, para isso foi utilizado uma caixa plástica fechada, em que foi adicionada água até a metade inferior, garantindo a total imersão de um corpo de prova de cada espécie. A substituição da água foi realizada semanalmente para manter a uniformidade das condições experimentais. Os corpos de prova submetidos a condição PU, foram acondicionados na parte superior da caixa, sem contato direto com a água, porém expostos a alta umidade. Dessa forma, essas amostras permaneceram em condição de elevado teor de umidade devido ao ambiente saturado, conforme Figura 5.

Por sua vez, os corpos de prova correspondentes à condição absolutamente seca foram secos em estufa de ventilação forçada em condições controladas com temperatura fixada em 103 ± 2 °C.

FIGURA 5 - Recipiente para ambientação das madeiras nas condições de parcialmente úmida e submersa.



FONTE: Autor (2025).

Após ambientação dos corpos de prova nas três condições de umidade, estes foram processados mecanicamente em plaina desempenadeira, equipada com cabeçote de 10 cm de diâmetro, contendo duas facas novas, operando a uma velocidade de corte $18,2 \text{ m.s}^{-1}$ (Figura 6).

FIGURA 6 - Processamento mecânico dos corpos de prova em plaina desempenadeira.



FONTE: Autor (2025).

3.2. RUGOSIDADE, ANÁLISE VISUAL E SUNSET LASER

A superfície usinada foi avaliada por meio de metodologias já consolidadas para análise da qualidade superficial de materiais processados mecanicamente, utilizando-se as técnicas de rugosidade, análise visual e *sunset* laser. As avaliações foram realizadas imediatamente após o aplainamento, de modo a preservar as condições de umidade das amostras.

A rugosidade superficial da madeira foi avaliada por meio dos parâmetros Ra, Rq e Rz, os quais são amplamente utilizados para a caracterização de materiais biológicos, como a madeira, em função da sua eficiência na descrição das irregularidades superficiais (MARH, 1999). As medições foram realizadas com um rugosímetro de arraste, modelo SURFTEST SJ-210 (Mitutoyo), posicionado paralelamente às fibras da madeira. O procedimento foi conduzido conforme a metodologia descrita por Silva et al. (2006), e seguindo as diretrizes da NBR ISO 4287 (ABNT, 2002) e NBR ISO 4288 (ABNT, 2008), que definem os princípios e parâmetros para a medição da rugosidade em superfícies.

O parâmetro Ra ou rugosidade média corresponde à média aritmética de todos os desvios do perfil na superfície em relação à linha média, sendo a medida mais comum, usada amplamente na indústria. A fórmula para obtenção do parâmetro Ra é a seguinte:

$$Ra = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |y(x)| dx$$

Em que:

Ra: rugosidade média aritmética.

l_r : comprimento da amostragem (*cut-off*).

$y(x)$: desvio vertical (pico/vale) em relação à linha média.

O parâmetro Rq ou rugosidade quadrática média é a raiz quadrada da média dos quadrados das diferenças de altura entre a superfície a linha média. Em relação ao Ra, esse parâmetro é mais sensível a picos e vales grandes, já que esses valores são elevados ao quadrado. A fórmula para obtenção do parâmetro Rq é a seguinte:

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |z^2(x)| dx}$$

Em que:

Rq: rugosidade quadrática média.

l_r : comprimento da amostragem (*cut-off*).

$z^2(x)$: quadrado das diferenças de altura em relação à linha média.

O parâmetro Rz ou altura máxima de rugosidade é a soma do maior pico e maior vale ao longo comprimento de medição. A fórmula para obtenção do parâmetro Rz é a seguinte:

$$Rz = Rp + Rv$$

Em que:

Rz: altura máxima do perfil de rugosidade.

Rp: maior pico de rugosidade.

Rv: maior vale de rugosidade.

O comprimento de amostragem adotado foi de 0,8 mm, com comprimento total de medição de 8 mm. As avaliações foram realizadas na face de maior visibilidade das tábuas, correspondes à sua largura. Para cada acabamento superficial, foram analisados 100 pontos por corpo de prova, com o objetivo de reduzir a margem de erro experimental, e aumentar a precisão e a confiabilidade na caracterização da rugosidade superficial da madeira.

A análise visual da superfície da madeira foi conduzida de acordo com os critérios da norma ASTM D 1666-11 (American Society for Testing and Materials – ASTM, 2011), sendo uma forma de classificar as madeiras usinadas e auxiliar na compreensão de sua adequação para diferentes usos após o processamento. A classificação da qualidade da superfície usinada é realizada de modo a atribuir notas para a superfície usinada, classificando-as quanto aos defeitos visíveis a olho nu (Tabela 1).

TABELA 1 - Atribuição de notas quanto a qualidade da superfície usinada considerando defeitos visíveis a olho nu.

Nota	Qualidade da superfície da madeira usinada	Classificação da superfície aplainada
1	Superfície isenta de quaisquer defeitos	Excelente
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: Adaptado de ASTM D 1666-11 (ASTM, 2011).

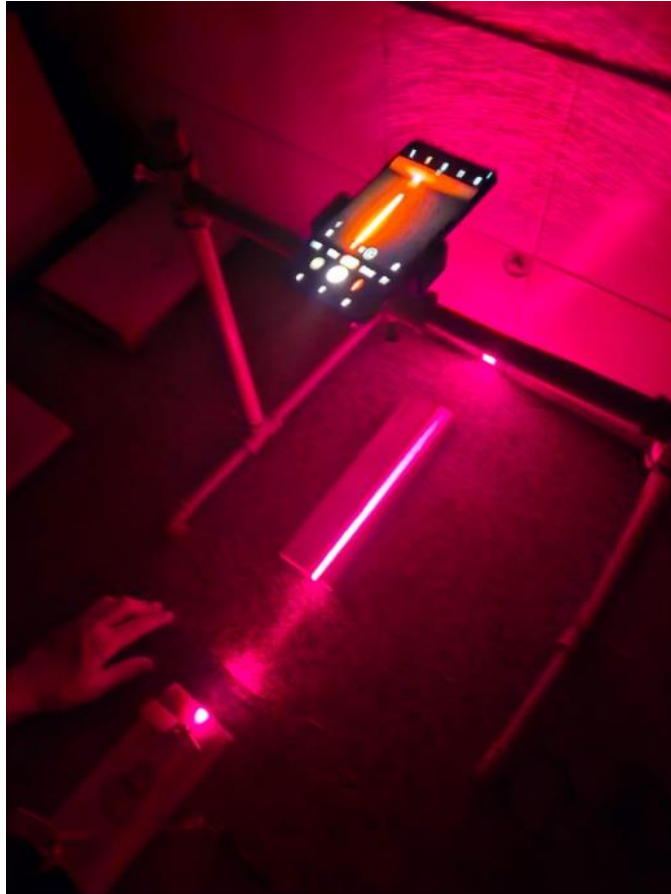
A avaliação foi realizada por três observadores treinados. As notas atribuídas foram comparadas inicialmente duas a duas, e posteriormente, confrontadas com a nota do terceiro avaliador. Quando não houve concordância entre as notas propostas, adotou-se a média aritmética das três notas para definição do resultado final, conforme proposto por SILVA et al. (2006).

O terceiro método de avaliação da qualidade superficial das amostras de madeira foi realizada pela técnica *sunset* laser, um método não destrutivo que destaca imperfeições na superfície utilizando iluminação a laser em baixa inclinação. Por ser não destrutivo, o *sunset* laser pode ser aplicado durante o processo produtivo, sem que haja qualquer interferência no produto final (SORAGI, 2009; ANDRADE et al., 2016).

Para a aplicação do método, utilizou-se um laser de diodo com comprimento de onda de 632 nm e potência de 3 mW, incidindo a um ângulo de 3° de modo a manter o feixe de luz o mais paralelo possível à amostra analisada. A captura das imagens foi realizada por uma câmera de um celular *smartphone android*, com resolução de 50 MP, lente de 74° e abertura f/1.8, posicionada a 30 cm de distância da amostra e paralelamente ao plano da superfície, assegurando a aquisição detalhada das áreas iluminadas pelo feixe de laser (Figura 7).

As imagens foram processadas e analisadas por meio do software livre ImageJ, conforme metodologia proposta por ANDRADE et al. (2016). Para aprimorar a identificação das imperfeições, as imagens foram convertidas para escala de cinza (8-bit), ou seja, 256 níveis de cinza, e ajustadas de modo a realçar defeitos como arrancamento e arrepiamento de fibras, que também são considerados na avaliação visual da qualidade superficial.

FIGURA 7 - Estrutura usada para a técnica *sunset* laser.



FONTE: Autor (2025).

3.3. MÉTODO OPARÁ

3.3.1 HISTOGRAMA

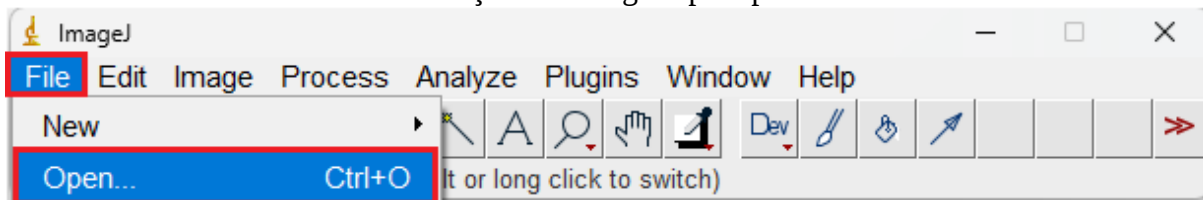
A proposta desta nova metodologia consiste na obtenção de imagens em alta definição da superfície da madeira por meio de um digitalizador, seguida do processamento dessas imagens no software ImageJ, visando a comparação dos resultados com aqueles obtidos por outros métodos de avaliação da qualidade superficial.

As imagens devem ser obtidas através da função *Scan*, presente em digitalizadores, podendo ser utilizados os formatos TIFF, GIF, JPEG, BMP, DICOM e FITS, os quais são compatíveis com o software ImageJ (SCHNEIDER et al., 2012). As imagens digitalizada não possuem dimensão pré-definida, sendo necessário apenas a visualização da área de interesse para análise. Para o presente trabalho, as imagens foram digitalizadas no Laboratório de Análise de Sementes (LABSEM), utilizando-se o equipamento GroundEye, que permite a geração de imagens em alta definição para análises detalhadas da superfície de madeira.

Recomenda-se a criação de uma pasta específica no computador destinada exclusivamente ao armazenamento das imagens digitalizadas, de modo a facilitar sua organização, localização e posterior análise. As etapas subsequentes referem-se ao

processamento e análise das imagens no *software ImageJ*, um programa de domínio público, desenvolvido em linguagem Java, disponível em: <https://imagej.net/ij/>. Como etapa inicial do procedimento da análise, a imagem deve ser aberta no ImageJ por meio da função *Open*, acessível pelo caminho **File > Open** ou pelo atalho de teclado **Ctrl+O** (Figura 8).

FIGURA 8 – Seleção das imagens para processamento.

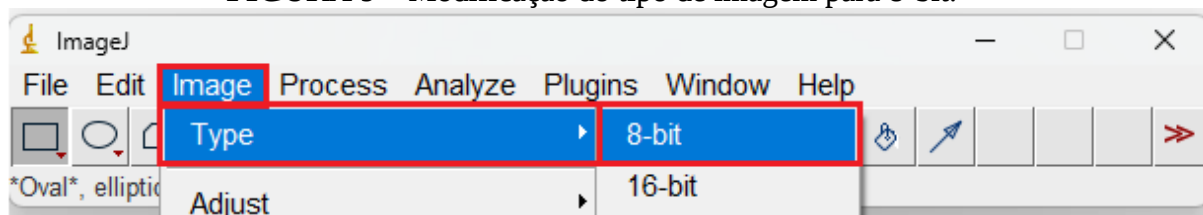


FONTE: Autor (2025).

A segunda etapa do procedimento é a conversão da imagem para o padrão digital 8 bits. Essa escolha deve-se ao fato de que, nesse formato, a imagem passa a ser representada em uma escala em tons de cinza, podendo apresentar até 256 níveis de intensidade (valores de 0 a 255), o que facilita a análise quantitativa por meio da ferramenta **Histogram**. A conversão da imagem para 8 bits segue a metodologia descrita por Andrade *et al.* (2016). Essa ferramenta permite avaliar a distribuição dos valores de intensidade em uma imagem, indicando a frequência de ocorrência de cada nível de cinza na amostra.

No contexto do presente estudo, o histograma é utilizado para calcular a distribuição dos níveis de cinza presentes na imagem, fornecendo informações como as dimensões da imagem em pixels, o número total de pixels analisados, média dos valores de intensidade, o desvio padrão entre outras métricas (Schneider *et al.*, 2012). Para realizar a conversão da imagem para o formato *8-bit* no *software ImageJ*, deve-se acessar o menu **Image > Type > 8-bit** (Figura 9).

FIGURA 9 – Modificação do tipo de imagem para 8-bit.

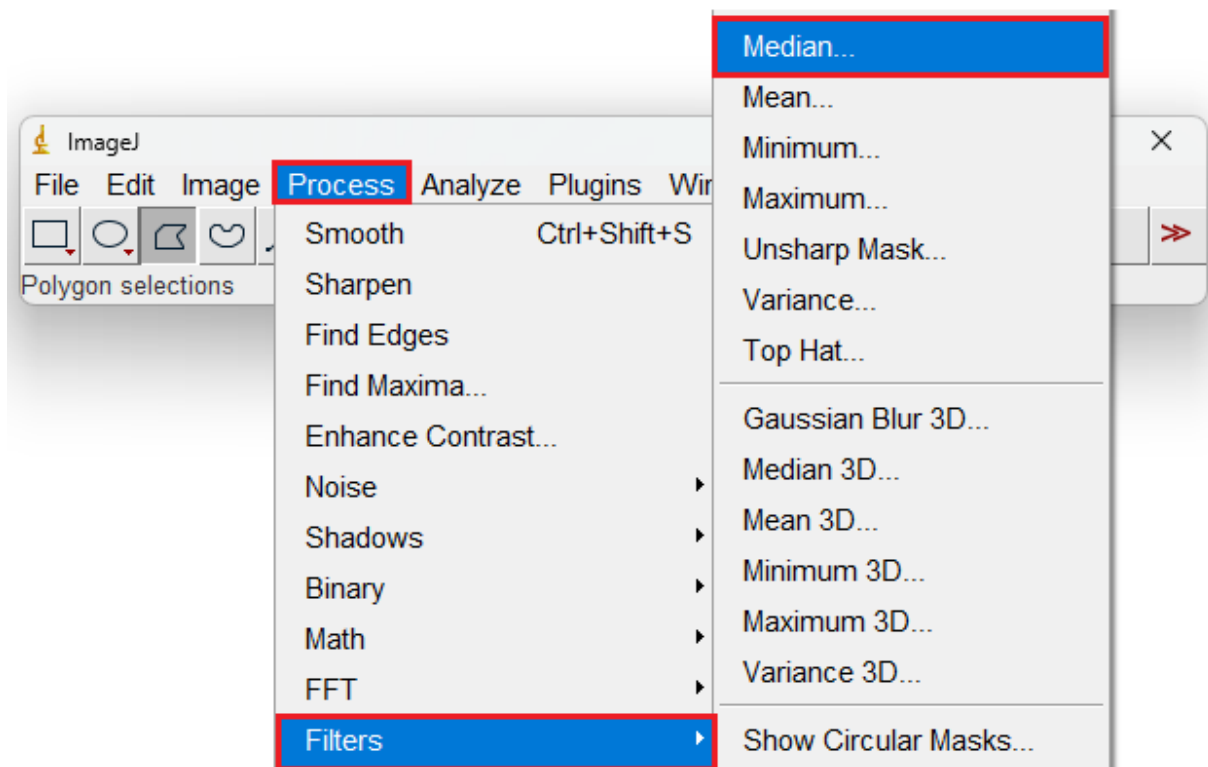


FONTE: Autor (2025).

A terceira etapa consiste na aplicação de um filtro à imagem, especificamente o filtro de mediana. Esse procedimento tem como objetivo a suavização da imagem, promovendo a redução de ruídos, uma vez que substitui o valor de cada pixel pela mediana dos valores de pixels vizinhos (Schneider *et al.*, 2012). Como consequência, ocorre a redução da variabilidade dos níveis de cinza, refletida, entre outros aspectos, na redução do desvio padrão obtido na análise do histograma. O filtro de mediana foi escolhido pois, após vários

testes com diversos filtro, este foi o que apresentou a maior diminuição do desvio padrão com a menor alteração do número total de pixels, quando comparado com a imagem sem tratamento. Para a aplicação do filtro de mediana, deve-se acessar o menu **Process > Filters > Median** (Figura 10).

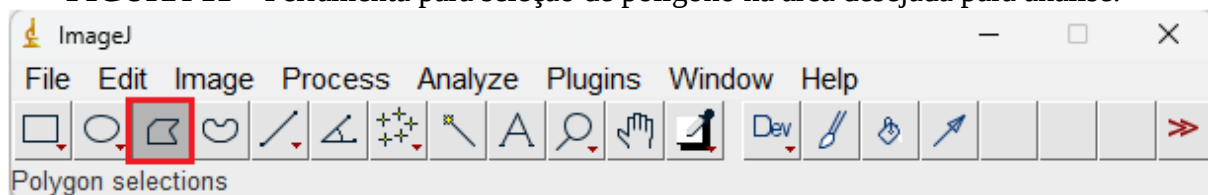
FIGURA 10 - Aplicação do filtro de mediana para suavização da imagem.



FONTE: Autor (2025).

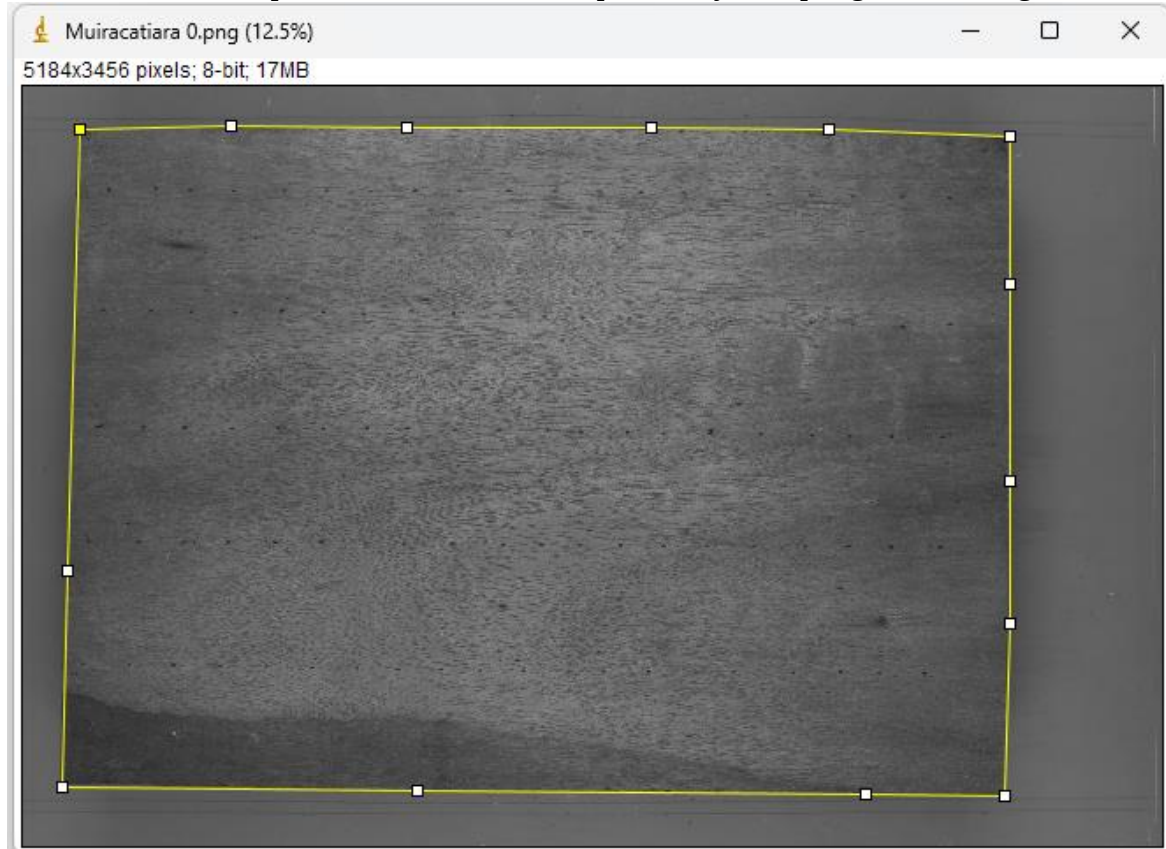
A quarta etapa do procedimento consiste na seleção da área de interesse para análise da qualidade superficial da madeira. Considerando que o método baseado no histograma busca estabelecer uma comparação direta com os métodos de análise visual e *sunset* laser, optou-se pela seleção de toda a área do corpo de prova, de forma análoga às metodologias já consolidadas. Para essa finalidade, utilizou-se a ferramenta de seleção por polígonos, a qual permite a delimitação precisa da área do corpo de prova por meio da inserção do número de pontos necessários para contornar toda a superfície analisada. O acesso à ferramenta de seleção por polígonos é apresentado na Figura 11, enquanto a Figura 12 ilustra um exemplo da área selecionada para a análise no presente trabalho.

FIGURA 11 – Ferramenta para seleção de polígono na área desejada para análise.



FONTE: Autor (2025).

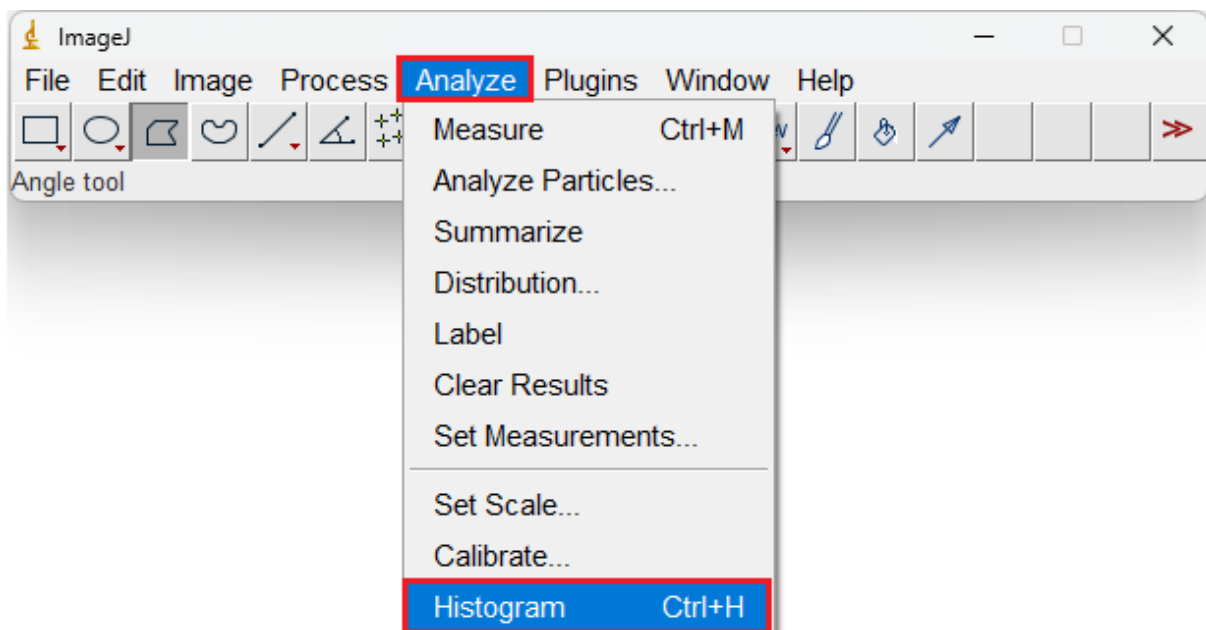
FIGURA 12 - Exemplo do uso da ferramenta para seleção de polígono em imagem 8-bit.



FONTE: Autor (2025).

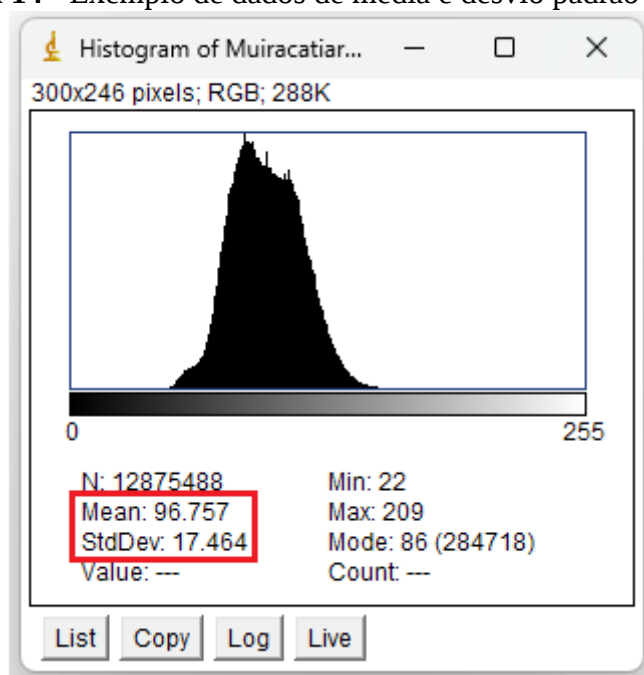
A quinta etapa do procedimento corresponde à utilização da função de histograma, acessível pelo caminho **Analyze > Histogram** ou por meio do atalho **Ctrl+H** (Figura 13). Essa ferramenta permite a análise estatística da distribuição dos níveis de cinza da imagem previamente selecionada. Para o presente estudo, os parâmetros de maior interesse na análise do histograma são média (*Mean*) e desvio padrão (*StdDev*), usadas para comparação de médias e estimativa de erro, respectivamente, conforme exemplificado na Figura 14, por serem métricas diretamente relacionadas à uniformidade e à variabilidade da superfície da madeira, possibilitando a comparação com os resultados obtidos pelos métodos de análise visual e *sunset* laser.

FIGURA 13 – Obtenção dos dados utilizando a ferramenta histograma.



FONTE: Autor (2025).

FIGURA 14 - Exemplo de dados de média e desvio padrão dos pixels.



FONTE: Autor (2025).

3.4. ANÁLISE ESTATÍSTICA

O experimento foi organizado e conduzido em forma de Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC), em esquema fatorial 3x3, sendo composto por três espécies de madeira e três condições de umidade, com repetições dentro de cada tratamento.

A análise de variância (ANOVA) foi empregada para verificar a existência de diferenças estatisticamente significativas entre espécies e condições de umidade. Quando detectada significância pelo teste F ($p < 0,05$), aplicou-se o teste de médias de Scott-Knott, por sua eficiência na formação de grupos homogêneos e ampla utilização em experimentos com produtos florestais.

Os dados obtidos foram exportados para um software de planilhas eletrônicas para análise estatística, durante o trabalho, utilizou-se o software Microsoft Excel. Os valores de média (*Mean*) e desvio padrão (*StdDev*) foram analisados conjuntamente com os resultados da análise visual, visando à avaliação da relação entre os métodos já consolidados com o método proposto. Para essa finalidade utilizou-se o coeficiente de correlação de Pearson (r), criado por Karl Pearson, que mede a força e a direção da relação linear entre duas variáveis, assumindo valores entre -1, que indica correlação negativa perfeita, e +1, que representa correlação positiva perfeita. O valor r igual a zero indica ausência de correlação linear entre as variáveis. O coeficiente de correlação de *Pearson* foi calculado conforme a Equação 1:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \underline{x})(y_i - \underline{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \underline{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \underline{y})^2}} \quad \text{Eq 1}$$

Em que:

r é o coeficiente de correlação de Pearson.

n é o número de observações.

x_i representam cada ponto de dados em uma variável, $0 \leq i \leq n$.

$\underline{x}$ é a média da variável x .

y_i representa cada ponto de dados na outra variável, $0 \leq i \leq n$.

$\underline{y}$ é a média da variável y .

Para a avaliação dos resultados obtidos com o coeficiente de correlação de Pearson, utilizou-se a interpretação dos valores de r , conforme apresentada na Tabela 2, a qual relaciona a magnitude do coeficiente com a intensidade da correlação entre as variáveis analisadas.

TABELA 2 - Coeficiente de correlação de Pearson.

Coeficiente de correlação	Correlação
$0,7 < r \leq 1$	Forte correlação positiva
$0,4 < r \leq 0,7$	Correlação positiva moderada

$0 < r \leq 0,4$	Correlação fraca positiva
$r = 0$	Sem correlação
$-0,4 \leq r < 0$	Correlação negativa fraca
$-0,7 \leq r < -0,4$	Correlação negativa moderada
$-1 \leq r < -0,7$	Forte correlação negativa

FONTE: Adaptado de University of Southampton.

Valores próximos a +1 indicam que as variáveis apresentam relação diretamente proporcionais, ou seja, tendem a aumentar conjuntamente. Por outro lado, valores próximos a -1 indicam uma relação inversamente proporcional, ou seja, o aumento de uma variável está associado à diminuição da outra.

Para o cálculo do coeficiente de correlação no Microsoft Excel utiliza-se a função **=PEARSON(A:A;B:B)**. Os dados devem estar organizados em colunas únicas, sendo que as colunas A e B representam, respectivamente, cada uma das variáveis analisadas. A Figura 15 ilustra um exemplo do uso da função de Pearson no Excel.

FIGURA 15 - Utilização da expressão de Pearson no software Microsoft Excel.

	A	B	C
1	Análise qualitativa	Histograma (8-bit/filtro median)	Correlação de Pearson
2	Análise Visual	Média	=PEARSON(A3:A11;B3:B11)
3	3	138.327	
4	3	163.968	
5	3	144.109	
6	3	168.089	
7	4	168.951	
8	3	163.690	
9	2	96.614	
10	2	98.549	
11	2	96.153	

FONTE: Autor (2025).

Além da correlação de Pearson, ajustou-se um modelo de regressão linear simples entre a média de pixels do histograma e o(s) métodos consolidados de avaliação da qualidade superficial. A Regressão Linear Simples (RLS) é um método de estatística para modelar a relação entre uma variável dependente (y) e uma variável independente (x), usada para entender padrões e fazer previsões, minimizando erros. A RLS é dada pela seguinte fórmula:

$$y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x$$

Em que:

y = variável resposta.

x = variável explicativa.

β_0 = intercepto.

β_1 = coeficiente angular.

Para avaliar o modelo de regressão usado, adotou-se a métrica RMSE (Root Mean

Squared Error) ou Raiz do Erro Quadrático Médio, que avalia a precisão de um modelo de regressão, medindo o desvio padrão de seus resíduos e indicando a dispersão dos dados em relação à linha de ajuste. Valores baixos indicam que as previsões do modelo estão próximas dos valores reais.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. RUGOSIDADE

Os valores médios de rugosidade demonstram que a madeira de Muiracatiara apresentou a melhor qualidade superficial com média de 5,182 μm , seguida pela madeira de Eucalipto, que apresentou qualidade superficial intermediária, com média de 5,970 μm , já a menor qualidade superficial foi constatada para a madeira de Pinus, com uma média 7,539 μm . Esses resultados são corroborados pela análise de variância (Tabela 3), na qual constatou a ocorrência de diferença estatisticamente significativa entre as condições avaliadas ao nível de 5% de significância ($p < 0,05$), considerando os parâmetros de rugosidade avaliados.

TABELA 3 - Resumo da ANOVA para as variáveis de rugosidade Ra, Rq, Rz.

FV	GL	QM		
		Ra	Rq	Rz
Madeira	2	78,309*	115,673*	1828,452*
Condição	8	24,654*	37,625*	594,316*
Repetição	99	-	-	-
Erro	889	-	-	-
CV (%)		42,95	45,64	41,72

LEGENDA: FV- FONTE de Variação; GL-Grau de liberdade; CV- Coeficiente de variação; QM- Quadrado médio; * significativo a 5% de significância.

FONTE: Autor (2025).

De acordo com o teste de médias Scott-Knott, ao nível de 5% de significância, observa-se que a Muiracatiara apresentou os menores valores para os parâmetros analisados em comparação às demais espécies estudadas, apresentando assim, melhor superfície de acabamento. A madeira de Eucalipto apresentou uma melhor superfície de acabamento para os parâmetros estudados em relação a madeira de Pinus. Por sua vez, a madeira de Pinus apresentou os maiores valores dos parâmetros avaliados, evidenciando a menor qualidade de acabamento entre as madeiras estudadas (Tabela 4).

TABELA 4 - Valores médios das espécies analisadas relativos aos parâmetros de rugosidade Ra, Rq, Rz.

Espécie	Média		
	Ra	Rq	Rz
Muiracatiara	1,925 a1	2,456 a1	11,164 a1
Eucalipto	2,305 a2	2,929 a2	12,677 a2
Pinus	2,937 a3	3,687 a3	15,991 a3

FONTE: Autor (2025). Médias seguidas dos mesmos números na mesma coluna são estatisticamente iguais e médias seguidas de números diferentes na mesma coluna são estatisticamente diferentes. Não foi avaliada a diferença entre linhas.

Tal resultado pode ter relação com as diferentes densidades básicas das espécies estudadas, uma vez que a espécie de maior densidade apresentou melhor qualidade superficial, de maneira contrária a espécie que apresentou pior qualidade superficial foi aquela com menor densidade básica. Entretanto, outros fatores também podem influenciar na qualidade da superfície usinada, como a direção da grã da madeira por exemplo, que não foi objeto deste estudo (COSTA, 2020). Nota-se que, na condição absolutamente seca (AS), as madeiras diferiram entre si para os três parâmetros analisados. Nessa condição, a madeira de Muiracatiara apresentou a melhor qualidade da superfície acabada, seguida pela madeira de Eucalipto, enquanto a madeira de Pinus apresentou a pior qualidade de superfície usinada, sendo estatisticamente distinta das demais.

Na condição parcialmente úmida (PU), para aos parâmetros estudados, a madeira de Muiracatiara e de Eucalipto foram as que apresentaram a melhor qualidade superficial, não diferindo estatisticamente entre si. A madeira de Pinus para a mesma condição apresentou maiores valores de rugosidade o que indica inferior qualidade superficial.

Na condição submersa (SUB), o comportamento observado foi semelhante ao verificado na condição AS. A madeira de Muiracatiara apresentou a melhor qualidade superficial madeira de Eucalipto apresentou qualidade intermediária e a madeira de Pinus apresentou a pior qualidade de acabamento. As diferenças entre as espécies foram confirmadas pelo teste de médias de Scott-Knott, ao nível de 5% de significância, conforme apresentado na Tabela 5.

TABELA 5 - Valores médios das diferentes condições analisadas relativos aos parâmetros de rugosidade Ra, Rq, Rz.

Condição da madeira	Espécie	Ra (µm)	Rq (µm)	Rz (µm)
AS	Pinus	2,739 a3	3,420 a3	14,766 a3
	Eucalipto	2,183 a2	2,743 a2	12,009 a2
	Muiracatiara	1,646 a1	2,116 a1	9,843 a1
PU	Pinus	2,809 a3	3,537 a3	15,488 a3
	Eucalipto	2,321 a2	2,911 a2	12,692 a2
	Muiracatiara	2,289 a2	2,924 a2	12,996 a2
SUB	Pinus	3,264 a4	4,105 a4	17,719 a4
	Eucalipto	2,413 a2	3,135 a3	13,332 a2
	Muiracatiara	1,842 a1	2,328 a1	10,654 a1

LEGENDA: AS- absolutamente seca; PU- parcialmente úmida; S- submersa. Médias seguidas dos mesmos números na mesma coluna são estatisticamente iguais e médias seguidas de números diferentes na mesma coluna são estatisticamente diferentes. Não foi avaliada a diferença entre linhas.

FONTE: Autor (2025).

No que se refere à rugosidade superficial, é necessário considerar que outros fatores, além da densidade básica, podem exercer influência significativa na qualidade da superfície das madeiras analisadas, tais como o processamento, a constituição anatômica e a composição química da madeira (CUNHA et al., 2023; REIS et al., 2025). PEREIRA et al. (2018) e REIS et al. (2025) ressaltam em seus respectivos estudos, que madeiras com superfícies lisas e pouco rugosas são objeto de interesse do setor moveleiro, uma vez que apresentam melhor aderência de revestimentos. Tal afirmação reforça a preferência da indústria moveleira por espécies como a Muiracatiara (CUNHA et al. 2023).

Entretanto, os resultados obtidos neste estudo não inviabilizam o uso das madeiras de Pinus e Eucalipto no setor moveleiro, uma vez que a aplicação de produtos de acabamento, bem como, o lixamento, pode contribuir para a redução da rugosidade, promovendo melhorias na qualidade superficial dessas madeiras (RAABE et al., 2017).

4.2. ANÁLISE VISUAL

A partir dos resultados da análise visual, nota-se que, na condição AS, as madeiras de Eucalipto e de Pinus apresentaram a pior qualidade da superfície aplainada, enquanto a madeira de Muiracatiara apresentou a melhor qualidade superficial nessa condição. Comportamento semelhante foi verificado na condição SUB, na qual a Muiracatiara manteve o melhor desempenho quanto à qualidade superficial, ao passo que as madeiras de Eucalipto e Pinus apresentaram as menores notas na análise visual.

Na condição PU, a análise visual evidenciou diferenças estatísticas entre todas as madeiras avaliadas. Nessa condição a madeira de Muiracatiara apresentou a melhor qualidade de acabamento, seguida pela madeira de Eucalipto, com desempenho intermediário, enquanto a madeira de Pinus apresentou a pior qualidade de acabamento. As notas atribuídas às madeiras nas três condições de umidade, com base na análise visual, encontram-se apresentadas na Tabela 6.

TABELA 6 - Notas da análise visual para a qualidade da superfície usinada.

Condição	Espécie	Notas da classificação da superfície usinada
AS	Pinus	3
	Eucalipto	3
	Muiracatiara	2
PU	Pinus	4
	Eucalipto	3
	Muiracatiara	2
SUB	Pinus	3

Eucalipto	3
Muiracatiara	2

LEGENDA: AS – Absolutamente seca, PU – parcialmente úmida e SUB – submersa.

FONTE: Autores (2025).

Dos nove corpos de prova analisados, a maior frequência de classe de defeitos encontrado foi a de arrepiamento forte e arrancamento leve (nota 3), registrado em cinco corpos de prova. Essa classificação foi atribuída à madeira de Eucalipto nas três condições de umidade estudadas e à madeira de Pinus em duas amostras, nas condições AS e SUB. A segunda maior frequência correspondeu à classe de arrepiamento leve a médio (nota 2), em três corpos de provas, todos para a madeira de Muiracatiara, independente da condição de umidade. Somente um corpo de prova apresentou presença de arrepiamento forte e arrancamento leve a médio (nota 4), identificado na madeira de Pinus sob a condição PU. Nenhum corpo de prova apresentou uma superfície isenta de defeitos (nota 1), nem com Presença de arrancamento forte, independente da ocorrência de arrepiamento (nota 5).

De acordo com SILVA et al. (2009), para a classificação da superfície usinada em madeiras deve-se utilizar apenas duas categorias: satisfatória e não satisfatória. Com base nesse critério, verificou-se que oito corpos de prova apresentaram qualidade satisfatória (notas entre 1 e 3) e somente a madeira de Pinus na condição de alta umidade apresentou qualidade não satisfatória (notas entre 4 e 5).

Um dos fatores que pode explicar os resultados observados está relacionado à densidade da madeira, que afeta diretamente a qualidade da superfície usinada. A madeira de Pinus, classificada em literatura como baixa densidade se comporta anatomicamente associada aos maiores diâmetros de lume, e por consequência paredes celulares mais delgadas dos traqueídeos. Essa configuração anatômica, inerente a madeiras de baixa densidade, contribui para que o rugosímetro constate picos e vales mais expressivos em comparação a madeiras de densidades mais elevadas. Importante reforçar que o alto teor de umidade, resulta em um material com baixa resistência mecânica. Tais características físicas e mecânicas, somadas a anatomia da madeira de Pinus, constituído de traqueídeos, resulta uma pior superfície acabada devido a facilidade de rompimentos dos seus elementos anatômicos (GUEDES, 2020).

Segundo GUEDES (2020), outro ponto a se destacar é que, em madeiras de baixa densidade e alto teor de umidade, o volume de material retirado durante o aplainamento é maior que em madeiras com densidade mais alta, ocorrendo assim acúmulo desses resíduos entre as lâminas e a madeira, fazendo com que o material alcance altas temperaturas e com isso facilite ainda a retirada severa de material no momento do acabamento, o que contribui

para a deterioração da qualidade superficial.

4.3. *SUNSET* LASER

Os dados referentes à porcentagem de área ocupada por defeitos, obtidos para todos os corpos de provas, encontram-se na Tabela 7.

TABELA 7 - Área do defeito para todas as condições de umidade.

Madeira	Condição	Área do defeito (%)
Eucalipto	0%	2,620
Eucalipto	Alta Umidade	0,438
Eucalipto	Submersa	0,181
Pinus	0%	1,921
Pinus	Alta Umidade	0,703
Pinus	Submersa	2,047
Muiracatiara	0%	0,128
Muiracatiara	Alta Umidade	0,151
Muiracatiara	Submersa	0,052

FONTE: Autor (2025).

Os valores médios para área ocupada por defeitos variaram entre 1,080% para a madeira de Eucalipto, 1,557% para a madeira de Pinus e 0,110% para a madeira de Muiracatiara. Por apresentar menor média de área defeituosa, a madeira de Muiracatiara possui uma melhor qualidade da superfície entre as espécies avaliadas, enquanto a madeira de Pinus apresentou a maior média, indicando maior incidência de defeitos na superfície usinada. Esses resultados estão de acordo com as notas atribuídas pelos métodos de rugosidade (Tabela 4) e de análise visual (Tabela 6), nos quais a madeira de Muiracatiara apresentou as melhores notas (nota 2 - arrepiamento leve a médio). A madeira de Pinus apresentou as piores notas com ocorrência de - arrepiamento forte e arrancamento leve (nota 3) e, em alguns casos, arrepiamento forte e arrancamento leve a médio (nota 4).

ANDRADE (2015) em estudo semelhante, trabalho encontrou valores de 3% de área de defeito para madeiras sem nenhum tipo de acabamento superficial. OLIVEIRA et al. (2015) em seu trabalho encontraram valores médios de 0,13% para madeiras submetidas a processos de acabamento. É importante destacar que o acabamento tem finalidade de melhorar a qualidade da superfície, diminuindo a área ocupada por defeitos.

Entre os fatores que podem influenciar o aumento da área de defeitos, bem como sua distribuição em pontos específicos na superfície, destaca-se a ausência de padronização da velocidade de avanço para os diferentes tipos de madeira. Sem o devido ajuste de parâmetros de corte e forças inadequadas para espécies com densidades distintas ocasionam um maior desgaste da superfície durante o aplainamento em plaina desempenadeira.

Desse modo, os valores encontrados para área do defeito obtidos por meio da técnica *sunset* laser poder ser considerados baixos. A madeira de Muiracatiara apresentou qualidade suficiente dispensando técnicas de acabamento, enquanto as madeiras de Eucalipto e Pinus

apresentaram recomendação de retrabalho para a redução da área de defeitos e à melhoria da qualidade superficial.

4.4. MÉTODO OPARÁ

Os valores médios obtidos a partir da análise do histograma demonstram que a madeira de Muiracatiara apresentou menor valor médio de pixels, com 97,105 pixels, seguida da madeira de Eucalipto, com média de 148,801 pixels. A madeira de Pinus apresentou o maior valor médio, com 166,910 pixels. Esses resultados encontram-se na Tabela 8, a qual resume a análise de variância ao nível de 5% de significância, resultando em diferença estatisticamente significativa entre as espécies avaliadas.

TABELA 8 – Resumo da ANOVA para a variável média de pixels nas diferentes espécies.

FV	GL	QM
Espécies	2	3936,546*
Erro	6	63,486*
Total corrigido	8	-
Coefficiente de Variação (%)	5,79	-

LEGENDA: FV- FONTE de Variação; GL-Grau de liberdade; CV- Coeficiente de variação; QM- Quadrado médio; * significativo a 5% de significância.

FONTE: Autor (2025).

Quando comparados aos resultados da análise visual, observa-se uma tendência que se repete entre as espécies avaliadas. A madeira de Muiracatiara apresentou as menores notas nas duas metodologias, indicando melhor qualidade da madeira. Na análise visual, esse desempenho está associado à menor presença de defeitos visíveis, enquanto, na análise do histograma, relaciona-se à menor variação nos níveis de cinza próximos ao valor máximo a (255), resultando em superfícies mais homogêneas e com menos defeitos visíveis. Do mesmo modo ocorre nas madeiras de Eucalipto e Pinus, que apresentam valores mais elevados nas duas metodologias. Esses resultados indicam maior presença de defeitos visíveis na análise visual e maior variação nos níveis de cinza na análise por histograma, refletindo superfícies mais heterogêneas e com maior ocorrência de áreas defeituosas.

Para reforçar essas observações, foi aplicado o teste de médias de Scott-Knott aos valores médios de pixels obtidos para as três espécies avaliadas, ao nível de 5% de significância (Tabela 9). Os resultados desse teste corroboram aqueles obtidos pelas metodologias consolidadas de análise visual e *sunset* laser, evidenciando a superior qualidade superficial da madeira de Muiracatiara, o desempenho intermediário da madeira de Eucalipto e a inferior qualidade superficial da madeira de Pinus.

TABELA 9 – Teste de Scott-Knott com valores médios de pixels para cada espécie.

Espécie	Média (pixels)
Muiracatiara	97,105 a1
Eucalipto	148,801 a2
Pinus	166,910 a3

FONTE: Autor (2025). Médias seguidas dos mesmos números na mesma coluna são estatisticamente iguais e médias seguidas de números diferentes na mesma coluna são estatisticamente diferentes. Não foi avaliada a diferença entre linhas.

Com o objetivo de estabelecer um comparativo entre os métodos testados, a Tabela 10 apresenta a relação entre as médias de pixels obtidas por meio da análise do histograma e os resultados das análises qualitativas realizadas no experimento.

TABELA 10 - Relação análises qualitativas e histograma.

Madeiras		Análise qualitativa		Histograma (8-bit/median)	
Espécie	Condição	Área de defeitos (%)	Análise visual	Média (pixels)	Desvio padrão
Eucalipto	0%	0,370	3	138,327	23,630
Eucalipto	Alta Umidade	0,438	3	163,968	22,072
Eucalipto	Submersa	0,181	3	144,109	28,336
Pinus	0%	1,921	3	168,089	13,903
Pinus	Alta Umidade	0,703	4	168,951	17,549
Pinus	Submersa	2,047	3	163,690	18,863
Muiracatiara	0%	0,128	2	96,614	15,959
Muiracatiara	Alta Umidade	0,151	2	98,549	17,724
Muiracatiara	Submersa	0,052	2	96,153	17,459

FONTE: Autor (2025).

A aplicação do coeficiente de correlação de Pearson entre os resultados do histograma e as metodologias de análise visual e *sunset* laser resultou em valores de 0,892 indicando correlação forte entre a média de pixels do histograma e as notas atribuídas na análise visual, e de 0,672, caracterizando correlação moderada entre a média de pixels e a porcentagem de área de defeito. A observação de correlações forte sugere a metodologia Opará como uma possibilidade viável, de baixo custo e assertividade nas classificações da madeira quanto sua qualidade superficial.

Em ambos os casos, observou-se correlação diretamente proporcional, indicando que menores valores atribuídos na análise visual (melhores notas), estão associados a menores médias de pixels na imagem. Esse comportamento reflete uma menor variação nos níveis de cinza, resultando em imagens mais suaves e homogêneas, e consequentemente, em superfícies usinadas de melhor qualidade. A relação entre média de pixels e área de defeitos apresentou a t mesma orientação, porém com menor intensidade de associação quando comparada à correlação com a análise visual.

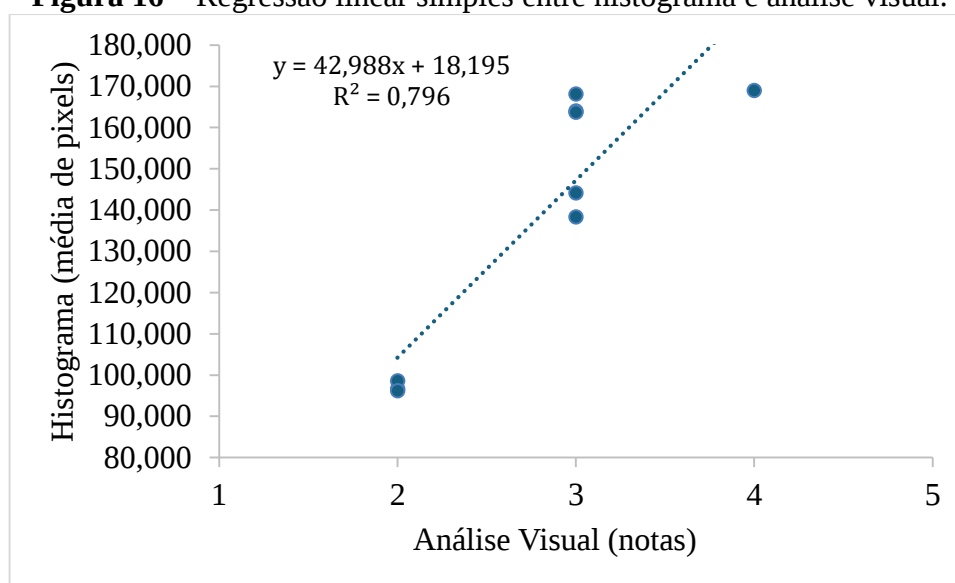
YORULMAZ (2025) descreve que altos valores de variação dos pixels na escala de cinza estão associados a superfícies mais complexas e heterogêneas, enquanto menores variações indicam superfícies mais organizadas e homogêneas. Dessa forma, regiões da madeira que apresentam maior variação nos níveis de cinza tendem a corresponder a superfícies irregulares, com ocorrência de arrepiamento ou arrancamento de fibras, evidenciadas por picos mais acentuados no histograma.

4.5. REGRESSÃO LINEAR ENTRE OPARÁ E ANÁLISE VISUAL

Optou-se inicialmente pela utilização da média dos níveis de cinza do histograma por sua simplicidade, interpretação direta e elevada correlação (0,892) com a análise visual. Embora outros parâmetros estatísticos do histograma possam fornecer informações complementares, a média mostrou-se adequada para avaliar o potencial preditivo do método proposto. No caso, o histograma passa a ser a variável explicativa (x), e os métodos consolidados passam a ser a variável resposta (y).

A regressão linear simples indicou relação diretamente proporcional entre a média de pixels do histograma e as notas atribuídas na análise visual. O coeficiente de determinação (R^2) evidenciou que grande parte da variação observada na avaliação visual da superfície da madeira pode ser explicada pela variação da média dos níveis de cinza obtidos por imagens digitalizadas. O modelo apresentou $R^2 = 0,796$, indicando que aproximadamente 80% da variação das notas da análise visual pode ser explicada pela média de pixels do histograma. Essa relação gráfica entre análise visual e do histograma encontra-se abaixo, na Figura 16.

Figura 16 – Regressão linear simples entre histograma e análise visual.



FONTE: Autor (2025).

Para determinar a precisão do modelo de regressão, utilizou o RMSE, que encontrou valores que variaram entre 0,003 e 0,284, considerados baixos. Valores reduzidos de RMSE indicam maior capacidade do modelo em estimar a qualidade superficial da madeira a partir do histograma. A Tabela 11 mostra um resumo da análise de regressão linear simples entre os dados de médias de pixels do histograma e as notas da análise visual.

TABELA 11: Resumo da regressão linear simples entre histograma e análise visual

Intercepto (β_0)	Coefficiente angular (β_1)	Coefficiente de determinação	Valores estimados	RMSE
--------------------------	------------------------------------	------------------------------	-------------------	------

(R ²)				
0,230	0,019	0,796	2,791	0,284
			3,266	0,275
			2,898	0,261
			3,342	0,258
			3,358	0,232
			3,261	0,089
			2,019	0,020
			2,055	0,018
			2,010	0,003

FONTE: Autor (2025).

4.6. LIMITAÇÕES DO HISTOGRAMA

Durante o desenvolvimento do trabalho foram encontradas algumas limitações que podem prejudicar ou retardar a aplicação da metodologia histograma em escalas maiores. O principal entrave está ligado a obtenção das imagens através de um digitalizador, que limita o tamanho das amostras analisadas, muito provavelmente, às mesmas dimensões que uma folha A4, dificultando a aplicação desse método para maiores superfícies e corpos de prova.

Quanto ao processamento das imagens e obtenção dos dados, o uso da média de pixels como dado principal limita a precisão na questão qualitativa, já que não consegue descrever a dispersão dos defeitos (superfícies heterogêneas), não representa assimetria nos corpos de prova (defeitos localizados) e não diferencia superfícies com mesma média, mas distribuição diferente.

5. CONCLUSÃO

5.1. CONCLUSÕES CIENTÍFICAS

- A metodologia de rugosidade indicou que a madeira de Muiracatiara apresentou a melhor qualidade superficial, com valor médio de 5,182 μm , seguida da madeira de Eucalipto, 5,970 μm , enquanto a madeira de Pinus apresentou a pior qualidade superficial, com valor médio de 7,538 μm .
- A análise visual classificou a madeira de Muiracatiara como a melhor qualidade da superfície usinada, com as melhores notas (nota 2 - arrepiamento leve a médio). A madeira de Eucalipto apresentou qualidade intermediária (nota 3 - arrepiamento forte e arrancamento leve), enquanto a madeira de Pinus foi classificada como a pior qualidade superficial, apresentando com as piores notas (nota 3 - arrepiamento forte e arrancamento leve; nota 4 - arrepiamento forte e arrancamento leve a médio).
- A metodologia *sunset* laser apresentou baixos valores de área de defeitos para as três espécies testadas, com médias de 1,557% para a madeira de Pinus, 1,080% para a madeira de Eucalipto e 0,110% para a madeira de Muiracatiara. Entre as madeiras testadas, a madeira de Muiracatiara apresentou a melhor qualidade da superfície

usinada, seguida da madeira de Eucalipto, enquanto a madeira de Pinus apresentou a pior qualidade da superficial.

- A metodologia baseada em histograma de níveis de cinza classificou a madeira de Pinus como aquela com maior variação média de pixels (166,910 pixels), seguida da madeira de Eucalipto (148,801 pixels), enquanto a madeira de Muiracatiara apresentou a menor variação média (97,105 pixels). Esses resultados são consistentes com as metodologias consolidadas de avaliação da qualidade superficial da madeira, classificando, respectivamente, as madeiras de Muiracatiara, Eucalipto e Pinus, como de melhor, intermediária e pior qualidade superficial.
- A metodologia Opará pode ser empregada como metodologia alternativa à análise visual (ASTM D 1666-11), em função da forte correlação positiva observada entre ambas ($r = 0,892$). Dessa forma, espera-se garantir melhores condições de reprodutividade entre as micro e pequenas indústrias do setor moveleiro.
- A metodologia Opará pode ser utilizada como alternativa para avaliação da superfície da madeira com a técnica de *sunset* laser. Embora a correlação entre essas duas metodologias serem moderada ($r = 0,672$) a análise por histograma apresenta vantagens operacionais, uma vez que avalia a totalidade da superfície analisada, diferentemente do *sunset* laser, que se baseia em amostragens pontuais.
- A regressão linear simples demonstra que o histograma de níveis de cinza não apenas se correlaciona, mas possui potencial preditivo na estimativa da qualidade superficial da madeira, reforçando sua aplicabilidade como ferramenta objetiva e de baixo custo.

5.2. RECOMENDAÇÕES PRÁTICAS

- Recomenda-se a criação de uma nova pasta no computador apenas para armazenamento e fácil localização dessas imagens, facilitando suas análises.

6. TRABALHOS FUTUROS

- Testar a metodologia Opará com outras espécies.
- Testar diferentes parâmetros de usinagem.
- Automatizar o método (script ImageJ ou IA).

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 1666-11:**

standard method for conducting machining tests of wood and wood base materials.

Philadelphia, 2011. p. 226-245.

ANDRADE, A. C. A. **Sunset laser na análise de defeitos em madeiras usinadas**. 2015. 37 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras – MG.

ANDRADE, A. C. A., SANTOS, R. L., SANTOS, C., FONSECA, A. D., SANTANA NETO, A. M. & CARDOSO JÚNIOR, A. A. (2019). **Umidade da madeira como fator de influência no processamento**. Agropecuária Científica e no Semiárido, 15(3), 243-247.

ANDRADE, A. C. D. A., SILVA, J. R. M. D., BRAGA JUNIOR, R. A., & MOULIN, J. C. (2016). **Utilização da técnica sunset laser para distinguir superfícies usinadas de madeira com qualidades similares**. Cerne, 22, 159-162.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 4287: Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil – Termos, definições e parâmetros da rugosidade**, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 4288: Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil – Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade**, 2008.

COSTA, Jéssica Ester Elvas. **Estudo do potencial tecnológico de madeiras amazônicas para o design de móveis**. 2020. 194 f. Dissertação (Mestrado em Design) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus (AM), 2020.

CUNHA, S. C. A., ROCHA, A. L. M., SILVA, M., ANDRADE, A. C. DE A. & JUNIOR, A. A. C. (2023). **Qualidade superficial e custo-benefício de madeiras utilizadas na fabricação de móveis em Aracaju/SE**. Research, Society and Development, 12(6). <https://doi.org/10.33448/rsd-v12i13.44430>.

EYMA, F.; MÉAUSOONE, P. J.; MARTIN, P. **Strains and cutting forces involved in the solid wood rotating cutting process**. Journal of Materials Processing Technology, 148, 220–225, 2004.

GUEDES, T. O. **Análise da energia específica de corte e qualidade da superfície no aplainamento de madeiras**. 2020. 65 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2020.

KOCH, P. **Wood Machining Processes**. New York. Ronald Press Company. 1964. 530p.

LUCAS FILHO, F. C. **Análise da usinagem da madeira visando a melhoria de processos em indústrias de móveis.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. 2004.

MADY, F. T. C. **Xiloteca da Universidade Federal do Amazonas: coleção Dr. Valmir Souza de Oliveira.** Manaus: Eco & Companhia, 2017. Disponível em: <xiloteca.ufam.edu.br/downloads/livros-xiloteca/XILOTECA-UFAM_PT.pdf >. Acesso em: 27 nov. 2025.

MAHR, G. M. B. H. Mahr Perthomer. **Surface Texture Parameters, new standart DIN em ISO/ ASME.** 1999.

OLIVEIRA, M. R.; SILVA, J. A.; PEREIRA, M. R. **Qualidade e processamento da madeira serrada no Brasil: estado da arte.** Research, Society and Development, v. 10, n. 9, p. e252997258, 2021.

OLIVEIRA, M.B.; SILVA, J.R.M. da; ANDRADE, A. C. de A.; HEIN, P. R. G.; BRAGA JÚNIOR, R. A. **Utilização da técnica sunset laser para qualificação superficial em pisos de madeira.** In: Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira, Belo Horizonte, 2015. Anais... Belo Horizonte: CBCTEM, 2015.

PEREIRA, A. L.; STURION, J. A.; HIGA, A. R.; HIGA, R. C. V.; SHIMIZU, J. **Características da madeira de algumas espécies de Eucalipto plantadas no Brasil.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 22(6), 403-408, 2018.

PEREIRA, K. N., GONÇALEZ, J. C., RAABE, J. AND DA COSTA, A. F. (2017). **Surface quality of the Ficus sp. wood veneers submitted to finishing treatments.** Madera y Bosques, 23(2), 181-191. doi: 10.21829/myb.2017.2321224

RAABE, J.; DEL MENEZZI, C.; GONÇALEZ, J. **Avaliação da superfície de lâminas decorativas de curupixá (Micropholis venulosa Mart. Eichler).** Floresta e Ambiente, v. 24, n. 180, 2017.

REIS, K. DE J.; LIMA, M. R. N.; SANTOS, J. A.; DOS SANTOS, L. S. R.; VIEIRA, I. L. S. M.; CARDOSO JUNIOR, A. A.; ANDRADE, A. C. DE A. **Qualidade superficial da madeira de massaranduba após lixamento com diferentes granulometrias.** Research, Society and Development, 14(3), e6214348468-e6214348468, 2025.

SCHNEIDER, C., RASBAND, W. & ELICEIRI, K. **NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis**. Nat Methods 9, 671–675 (2012). <https://doi.org/10.1038/nmeth.2089>.

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

SILVA, J. T.; SOUZA, L. C.; BARROS, M. C. **Caracterização da rugosidade da madeira para diferentes tipos de usinagem**. Scientia Forestalis, n. 70, p. 187-196, 2006.

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

WHITEHOUSE, D. J. (1994). **Handbook of Surface Metrology**. IOP Publishing Ltd, London. 1994. 988 p.

YORULMAZ, T. E. **Decoding Image Secrets: A Hands-On Guide to GLCM Texture Analysis in Google Earth Engine**. Medium, 2025. Disponível

em:<<https://medium.com/@taremyor/decoding-image-secrets-a-hands-on-guide-to-glcm-texture-analysis-in-google-earth-engine-8788dbcac976>>. Acesso em: 27 nov. 2025.