



TAIANE OLIVEIRA GUEDES

**ANÁLISE DA ENERGIA ESPECÍFICA DE CORTE E
QUALIDADE DA SUPERFÍCIE NO APLAINAMENTO DE
MADEIRAS**

**LAVRAS – MG
2020**

TAIANE OLIVEIRA GUEDES

**ANÁLISE DA ENERGIA ESPECÍFICA DE CORTE E QUALIDADE
DA SUPERFÍCIE NO APLAINAMENTO DE MADEIRAS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração Ciência e Tecnologia da Madeira, para obtenção do título de Doutor.

Prof. Dr. José Reinaldo Moreira da Silva
Orientador

Prof. Dr. José Tarcísio Lima
Prof. Dr. Fábio Akira Mori
Coorientadores

LAVRAS - MG
2020

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

Guedes, Taiane Oliveira.

Análise da energia específica de corte e qualidade da superfície
no aplainamento de madeiras / Taiane Oliveira Guedes. - 2020.

65 p.

Orientador(a): José Reinaldo Moreira da Silva.

Coorientador(a): José Tarcísio Lima, Fábio Akira Mori.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2020.

Bibliografia.

1. Processamento Mecânico. 2. Otimização. 3. Rugosidade. I.
da Silva, José Reinaldo Moreira. II. Lima, José Tarcísio. III. Mori,
Fábio Akira. IV. Título.

TAIANE OLIVEIRA GUEDES

**ANÁLISE DA ENERGIA ESPECÍFICA DE CORTE E QUALIDADE DA
SUPERFÍCIE NO APLAINAMENTO DE MADEIRAS**

**ANALYSIS OF SPECIFIC CUTTING ENERGY AND SURFACE QUALITY IN
TIMBERS PLANING**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração Ciência e Tecnologia da Madeira, para obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 12 de março de 2020.

Prof. Dr. Anderson Paulo de Paiva	UNIFEI
Prof. Dr. Danton Diego Ferreira	DAT/UFLA
Prof ^a . Dra. Silvia Costa Ferreira	DAT/UFLA
Prof. Dr. Fábio Akira Mori	DEG/UFLA

Prof. Dr. José Reinaldo Moreira da Silva
Orientador

LAVRAS - MG

2020

Ao meu pai Oldeni, minha maior inspiração, sempre presente

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus que é meu amigo fiel.

À minha mãe Ivanete que é minha força, minha motivação e meu amor maior.

Ao meu padrasto Adilson por sempre me apoiar e incentivar.

Às minhas irmãs Odinéia e Ivi, minhas melhores amigas, confidentes, que sempre me apoiam, têm fé nos meus sonhos e se orgulham de mim.

Às minhas amigas queridas Gah, Sarinha e Tha que mesmo longe sempre me incentivam, partilham alegrias e tristezas e sentem orgulho de mim.

À minha família em Lavras, minha querida M4: Krill, Xi, Gabi, Nara, Ge e Manu! Vocês fizeram felizes meus dias, me ensinaram a compartilhar, aguentaram meu mau humor, me fizeram rir e choraram comigo, minha temporada em Lavras não teria sido tão especial sem vocês.

Ao pense: Anna, Lidy e Mônica por me ouvirem, aguentarem e compartilharem minhas loucuras, desabafos, devaneios, pensamentos inefáveis e serem minhas parceiras em tudo.

Aos amigos Jonnys, Zé e Raul que me ajudaram (muito!) no abate e desdobro das árvores e foram parte desse trabalho.

Aos amigos Jordão, Brenon, Rodrigo e Junim pelos bons momentos em Lavras.

Aos técnicos Heber, Carlos, Claret e Chica, sempre prontos para ajudar, em especial a minha amiga Raisia que por tantas vezes me deu força, me ouviu e encorajou.

Aos colegas do NEMAD, por dividirem comigo o ideal de que a pós-graduação vai além de teses e artigos.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira da UFLA pelos ensinamentos.

Aos professores José Reinaldo, José Tarcísio e Fábio Akira pela orientação e pelas contribuições com o trabalho e com minha formação.

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 estudos.

À Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelos recursos, subsídios, estruturas e equipamentos utilizados durante meu doutorado.

A todas as pessoas que sabem da importância da ciência, da pesquisa, do ensino público e do poder transformador da educação no mundo.

Agradeço!

“Educação não transforma o mundo. Educação muda as pessoas. Pessoas transformam o mundo.”

Paulo Freire

RESUMO

Neste trabalho, foi estudado como as características das madeiras de angiospermas e gimnospermas interferem em seu processamento mecânico e na qualidade da superfície após aplainamento. A abordagem desenvolvida propôs a caracterização do aplainamento quanto aos parâmetros exigidos pela máquina: torque (Nm), potência mecânica (kW), energia mecânica (J) e energia específica de corte ($J.cm^{-3}$). Ainda, foi analisada a rugosidade da superfície, associada às características da madeira. É preciso entender se durante o aplainamento as madeiras apresentam comportamento distinto e o porquê, propondo soluções para que aplainamentos combinados de diferentes espécies possam ser mais eficientes. O objetivo foi propor modelo de otimização dos parâmetros do aplainamento de madeiras para se obter menor consumo de energia específica de corte do motor e avaliar a qualidade da superfície obtida. Utilizou-se três árvores de *Bertholletia excelsa* e três árvores de *Pinus elliottii*, provenientes de plantio experimental da Universidade Federal de Lavras. A madeira de cada espécie foi caracterizada em sua anatomia, física e mecânica e posteriormente foi realizado o aplainamento com velocidade de avanço, velocidade de corte e profundidade de corte controladas. O experimento foi analisado em fatorial e a otimização proposta foi realizada pelo método de Taguchi. A qualidade da superfície foi medida por meio de rugosímetro de arraste e avaliada com imagens de microscopia eletrônica de varredura. Constatou-se que as madeiras apresentaram diferença no consumo de energia mecânica e de energia específica de corte, na potência e no torque exigidos do motor durante o aplainamento e que a rugosidade da superfície foi influenciada pela anatomia e pela densidade. Com o método Taguchi para otimização gerou-se modelo matemático cuja minimização conduz à redução do consumo de energia específica de corte. Os valores dos parâmetros de processo capazes de reduzir o consumo foram a velocidade de avanço de 10 m.min^{-1} , velocidade de corte de 22 m.s^{-1} e 1 mm de profundidade.

Palavras-chave: Consumo de energia mecânica. Otimização. Rugosidade. Taguchi.

ABSTRACT

In this work, it was studied how the characteristics of wood of angiosperms and gymnosperms interfere in their mechanical processing and in the quality of the surface after planing. The developed approach proposed the characterization of planing according to the parameters required by the machine: torque (Nm), mechanical power (kW), mechanical energy (J) and specific cutting energy ($\text{J}\cdot\text{cm}^{-3}$). In addition, the surface roughness, associated with the characteristics of the wood, was also analyzed. It is necessary to understand if, during planing, wood presents different behavior and why, proposing solutions so that combined planing of different species can be more efficient. The aim was to propose a model for the optimization of wood planing parameters, in order to achieve good surface quality and lower specific cutting energy consumption. Three trees of each *Bertholletia excelsa* and *Pinus elliottii* from experimental planting were used. The anatomical, physical and mechanical characteristics of the wood of the two species were determined and, later, planing was carried out with controlled advance speed, cutting speed and depth of cut. The experiment was analyzed in factorial and the proposed optimization was performed using the Taguchi method. The quality of the surface was measured by means of a rugosimeter and scanning electron microscopy images. The results allowed to conclude that the planing of the wood presented difference in the consumption of mechanical energy, of specific energy of cut, in the power and torque demanded by the motor. The surface roughness was influenced by anatomy and density. With the Taguchi method for optimization, the mathematical model was generated whose minimization leads to a reduction in the consumption of specific cutting energy. The values of the process parameters capable of reducing consumption were a feed speed of $10 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, a cutting speed of $22 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ and a depth of cut 1 mm.

Keywords: Mechanical energy consumption. Optimization. Roughness. Taguchi.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1 Características gerais das espécies <i>Bertholletia excelsa</i> Bonpl. e <i>Pinus elliottii</i> Engelm.....	15
2.2 A madeira como matéria-prima do processamento mecânico.....	16
2.3 Parâmetros do processamento mecânico da madeira.....	18
2.4 Fatores inerentes às máquinas de processamento mecânico.....	20
2.5 A rugosidade como forma de avaliar a qualidade da superfície após processamento	22
2.6 Otimização de processos pelo método Taguchi	24
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	28
3.1 Material biológico	28
3.2 Análises anatômicas	28
3.3 Análises físicas e mecânicas	29
3.4 Aplainamento e aquisição dos dados.....	30
3.5 Análise da qualidade da superfície com rugosímetro e microscopia eletrônica de varredura	32
3.6 Otimização dos valores de energia específica de corte	34
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4.1 Anatomia.....	36
4.2 Propriedades físicas e mecânicas.....	39
4.3 Aplainamento	40
4.4 Análise do experimento em fatorial	42
4.5 Análise de regressão para o consumo de energia específica de corte.....	45
4.6 Análise da qualidade da superfície por meio da rugosidade (Ra) e microfotografias	46
4.7 Otimização da energia específica de corte pelo método Taguchi	50
5 CONCLUSÃO	53

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
APÊNDICE I.....	60
APÊNDICE II.....	62

1. INTRODUÇÃO

O processamento mecânico é etapa primordial para todos os usos da madeira, como a produção de cavacos para a indústria de celulose, toretes para a indústria de carvão vegetal ou tábuas para a indústria de madeira serrada e moveleira. Ao se processar a madeira, como por exemplo, aplainando-a, é preciso conhecer e entender as suas propriedades anatômicas, químicas, físicas e mecânicas.

A madeira é formada por células de diferentes formatos, dimensões e arranjos de maneira singular para cada espécie. Essa heterogeneidade permite diferenciar as espécies e atribuir especialidades que influenciam em seu uso final (PANSHIN; DE ZEEUW, 1980; BURGUER; RICHTER, 1991) e essas características vão influenciar o processamento mecânico. As propriedades da madeira, como a anisotropia e a direção de seus elementos anatômicos, grã, podem favorecer a penetração da faca de corte. O plano anatômico escolhido para o corte ou ângulos menores de grã, por exemplo, permitem melhor penetração da faca de corte e menor arrancamento de fibras. Madeiras com maior densidade e dureza podem tornar maior a resistência ao corte. A higroscopicidade da madeira, ao permitir que a madeira diminua sua umidade, resulta em aumento da resistência mecânica (KOCH, 1964; BROWN; PANSHIN; FORSAITH, 1952; TSOUMIS, 1991). Somente com o conhecimento sobre a matéria-prima, a máquina, o meio, mão de obra e o método é possível se obter o melhor resultado do produto e do desempenho da operação.

Durante o processamento mecânico de madeiras, em geral, é perceptível que existem variações no atrito com a ferramenta, na força necessária ao corte, no consumo de energia e na qualidade da superfície usinada entre outras respostas ligadas ao desempenho do trabalho executado pela máquina. A qualidade da superfície pós processamento também é importante industrialmente, esta deve ser esteticamente interessante, resistente, permitir boa aderência a colas e vernizes, entre outras características que atribuem qualidades. Essas particularidades da superfície estão relacionadas com a rugosidade. A rugosidade é uma forma de analisar a superfície e qualificá-la, confirmando características de uso de determinado material. Seu estudo implica parâmetros que são calculados matematicamente com base nas saliências e reentrâncias da superfície observada e permitem comparações e análises entre padrões de superfície e materiais (MAHR, 1999). Entender a origem da rugosidade na madeira ainda é um desafio. Para isso é necessário caracterizar as propriedades tecnológicas e monitorar o processamento mecânico.

Os avanços esperados para o processamento mecânico da madeira acompanham a indústria global em busca de processos cada vez mais sustentáveis. Isso implica a redução de custos operacionais e melhoria da segurança e de ambientes de trabalho. A eficiência energética, no que tange menor consumo de energia mecânica das máquinas durante processamento, torna-se uma questão com impacto econômico e ambiental para a indústria. As máquinas devem trabalhar com desempenho máximo e evitar paradas indesejadas que podem ocorrer por sobrecarga. Portanto, uma das maneiras de se melhorar o processamento mecânico é com uso de técnicas de planejamento experimental que são importantes ferramentas para tornar processos eficientes e interessantes para a indústria. O planejamento experimental permite otimizar processos encontrando valores ideais das variáveis de interesse, reduzindo o número de ensaios e tornando o processo personalizado para o material.

As hipóteses levantadas para esse trabalho são: i) madeiras de coníferas, por terem anatomia mais simples, exigem menores esforços de corte, quando comparadas com folhosas? ii) é possível otimizar o processo de aplainamento de madeiras com anatomias diferentes, para um mesmo ajuste de parâmetros? iii) a estrutura anatômica da madeira pode ser associada com a rugosidade de forma quantitativa e qualitativa?

Desse modo, esse trabalho pretende propor a otimização do consumo de energia específica de corte para espécies com anatomias distintas e avaliar a relação das características intrínsecas da madeira com a qualidade após o aplainamento.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Características gerais das espécies *Bertholletia excelsa* Bonpl. e *Pinus elliottii* Engelm.

A *Bertholletia excelsa* Bonpl, conhecida popularmente como Castanheira-do-Brasil ou Castanheira-do-Pará é uma angiosperma da classe eudicotiledônea, ordem Myrtiliflorae e família Lecythidaceae. Apresenta árvores de grande porte, chegando a medir entre 30 a 50 metros de altura e 1 a 2 metros de diâmetro no tronco (MORI; PRANCE; DE ZEEUW, 1990).

Ocorre em toda a região amazônica, incluindo os estados de Roraima, Rondônia, Acre, Amazonas, Pará e a parte norte dos estados de Goiás e Mato Grosso, habitando matas de terra firme (LORENZI, 2002). Desenvolve-se bem em regiões de clima quente e úmido, em que predominam o tipo climático tropical chuvoso com ocorrência de períodos de estiagem definidos (MULLER et al., 1995).

A *B. excelsa* é uma espécie de uso múltiplo e exploração extrativista, quase todas suas partes podem ser utilizadas para algum fim. A casca pode tornar-se combustível para geração de energia em usinas. Do tronco, aproveitam-se a casca de forma medicinal e a madeira que apresenta boa qualidade, e é indicada para reflorestamento e emprego na construção civil e naval (FIEDLER; SOARES; SILVA, 2008). A amêndoa é o principal produto e pode ser utilizada: fresca, seca, ralada, em forma de óleo ou de bagaço para os mais diversos fins. Da amêndoa seca e cozida, é extraído o óleo utilizado na fabricação de produtos cosméticos e farmacêuticos apresentando grande importância econômica (PRANCE et al., 1998). No entanto, é importante ressaltar que de acordo com a Lei no 12.651 (BRASIL, 2012) apenas a madeira de reflorestamento é passível de corte para fins madeireiros. De acordo com a Portaria no 443, de 17 de dezembro de 2014, a *B. excelsa* consta da Lista Nacional Oficial de Espécies da Flora Ameaçadas de Extinção, na categoria vulnerável. É preciso assim adotar, práticas adequadas de manejo sustentável da espécie para conservar as árvores de *B. excelsa* nas áreas de ocorrência.

O *Pinus elliottii* Engelm. pertence à família Pinacea, dentro das Gimnospermas. É uma espécie originada dos Estados Unidos com ocorrência no Canadá. Foi introduzida no Brasil e hoje existem plantios nos estados do Amapá, Espírito Santo, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Pará, Paraná, Rio de Janeiro, Rio Grande do Sul, Santa Catarina e São Paulo (EMBRAPA, 2007).

As árvores de *P. elliottii* apresentam rápido crescimento, possuem grande porte atingindo de 13 a 30 metros. A madeira é utilizada para processamento mecânico e na extração

de resina. Entre suas características que diferenciam das demais espécies têm-se a exsudação de resina pelos cortes na madeira de forma abundante, acículas densas, compridas e de cor escura e cones pedunculados com escama sem espinho (KRONKA; BERTOLANI; PONCE, 2005).

Ambas as espécies, *B. excelsa* e *P. elliottii*, têm sido de grande importância econômica no Brasil. Plantios experimentais têm sido introduzidos em diferentes regiões buscando adaptação e condições que permitam a expansão territorial.

2.2 A madeira como matéria-prima do processamento mecânico

Durante o processamento da madeira, é preciso ter conhecimento sobre suas características intrínsecas por ser material biológico, heterogêneo, anisotrópico e higroscópico (PANSHIN; DE ZEEUW, 1980).

Diferentemente de materiais como aço, ferro e alumínio, em que é possível estabelecer padrões e prever comportamentos por serem considerados homogêneos, a madeira possui peculiaridades que podem afetar o seu processamento. Mas, sua complexidade não é vista de forma negativa, uma vez que, é um material com grande versatilidade de usos, alta resistência mecânica e sustentável (GAUZIN-MÜLLER; MARTINS; WISNIK, 2005). O comportamento da madeira durante o corte está relacionado com suas propriedades físicas como a densidade e a umidade (FRANZ, 1958; MCKENZIE, 1961; KOCH, 1964), propriedades mecânicas como a resistência (KRETSCHMANN; GREEN, 2007) e propriedades anatômicas como a disposição das fibras em relação a faca de corte (BROWN; PANSHIN; FORSAITH, 1952; KOLLMANN; COTÉ, 1968). Assim, pesquisas têm sido realizadas para entender de que forma a matéria-prima afeta o processamento no âmbito anatômico, físico, mecânico e em relação a outras propriedades.

Eyma, Méausoone e Martin (2004) utilizaram treze espécies tropicais para avaliar o efeito das características físicas (densidade e retratibilidade) e mecânicas (dureza, cisalhamento e compressão) nas forças de corte em usinagem do tipo fresagem com Comando Numérico Computacional (CNC), corte $90^\circ - 0^\circ$ e uso do dinamômetro para cálculo das forças de corte. Os autores afirmaram que as características, isoladamente, não foram capazes de explicar a força de corte, assim, foi ajustado um modelo de regressão linear múltipla contemplando todas as características estudadas (físicas e mecânicas) para prever a força de corte, o ajuste do modelo obteve coeficiente de determinação de 0,80, o que confirmou que as características

estudadas têm grande relação com a força de corte.

Hernandez-Castaneda, Sezer e Li (2011) verificaram o efeito da umidade da madeira ($U = 95\%$ e $U = 5\%$) na qualidade da superfície, avaliando a rugosidade (R_a) e no rendimento da usinagem em corte a laser da madeira de *Pinus* spp. Para a qualidade da superfície, o corte da madeira úmida obteve superfície 46% menos rugosa em comparação ao corte da madeira seca. Como resultado do rendimento da operação de corte, constataram que ao cortar as amostras úmidas, a profundidade do corte foi reduzida em 270% e o consumo de energia foi 290% maior em comparação com as amostras secas.

Naylor et al. (2012) avaliaram o efeito da umidade, das variáveis de corte (profundidade de corte e direção do corte), da direção da grã e das propriedades mecânicas (flexão e cisalhamento) para propor modelo matemático preditivo da força necessária ao corte. Utilizou-se madeiras saturadas (acima de 30% de umidade) e secas (abaixo de 5% de umidade), a fresagem foi realizada com CNC em oito espécies de madeira. Os autores conseguiram propor modelos com coeficientes de determinação altos ($R^2 = 0,80$ e $0,90$) e inferiram que as propriedades mecânicas tiveram maior relação com a força de corte quando comparada com a umidade e densidade nesse estudo.

Chulala et al. (2014) estudaram o efeito da densidade básica e da largura do anel de crescimento, em oito árvores de *Pinus sylvestris* coletadas em diferentes regiões, na potência de corte. O corte foi realizado em serra fita com dois níveis de avanço por dente (f_z). Os autores constataram, por meio de regressão linear, forte relação ($R^2 = 0,70$) entre a densidade e a força de corte para $f_z = 0,14$ mm.

Di Fulvio, Eriksson e Bergström, (2015) analisaram a influência da densidade da madeira de três espécies no consumo de energia específica de corte utilizando um picador elétrico para cavaquear a madeira. O consumo de energia foi monitorado por meio de um analisador de energia. Os autores comprovaram o efeito significativo da densidade no consumo de energia por meio de análise de variância ($\alpha = 0,05$).

Melo et al. (2015) avaliaram a relação entre os parâmetros anatômicos, a densidade básica da madeira e as forças de corte durante processamento mecânico em serra circular. Os autores encontraram, por meio de correlação linear, correlações positivas e altas entre o consumo de energia e o comprimento da fibra (94%), a espessura da parede da fibra (89%) e a fração parede da fibra (95%). A densidade básica apresentou forte coeficiente de determinação ($R^2 = 0,94$) em relação ao consumo de energia. O consumo médio de energia específica de corte obtido foi de 28 J.cm^{-3} .

Outros atributos da madeira como a idade do plantio também podem influenciar na usinagem. Silva, Castro e Evangelista (2015) avaliaram a madeira de *Eucalyptus grandis* com idades de 10, 14, 20 e 25 anos em testes de aplainamento, fresagem, cópia de perfil e furação. Considerando a quantidade de corpos de prova aprovados nos ensaios os autores constataram que a madeira de 10 anos foi a que apresentou desempenho mais baixo. A madeira de 14 anos atendeu aos testes normatizados e foi considerada recomendável para a indústria. As madeiras dos plantios de 20 e 25 anos foram consideradas semelhantes estatisticamente e com resultados superiores em nota de avaliação aos plantios mais novos, também recomendáveis para a indústria.

Melo et al. (2016) verificaram o efeito da densidade e da umidade no consumo de energia específica de corte. Os autores usinaram madeira de *Corymbia citriodora* Hill & Johnson em serra circular. As densidades, aparente ($R^2 = 0,73$) e básica ($R^2 = 0,94$), tiveram relação positiva com o consumo de energia. Em relação a umidade os autores encontraram relação negativa e baixa ($R^2 = -0,58$).

Nascimento et al. (2017) estudaram a relação entre diferentes umidades (2%, 12% e 75%) e o consumo de energia na usinagem de madeiras de *Eucalyptus urophylla* e *Corymbia citriodora* em serra circular, houve aumento no consumo da energia específica de corte com a redução da umidade de 75% (condição saturada) para 12% (condição de equilíbrio) e redução de 54% do consumo da energia de quando a madeira secou de 12% para 2% (condição seca) de umidade.

Laina et al. (2017) investigaram a influência das estruturas anatômica elemento de vaso, em folhosas, e traqueídes, em coníferas, na variabilidade da rugosidade da superfície após diferentes usinagens (lixamento com diferentes gramaturas e aplainamento). Foi observado que houve maior relação ($R^2 = 0,81$) entre o diâmetro de vasos e de traqueídes no lixamento com lixa de 180 de gramatura.

2.3 Parâmetros do processamento mecânico da madeira

O processamento mecânico deve ser planejado tendo em vista o objetivo final em dimensão, forma e acabamento da peça pretendida. Para se obter o processamento adequado cinco fatores são importantes: matéria-prima, máquina, metodologia, mão de obra e meio (BONDUELLE; CRUZ; SILVA, 2002). A definição de parâmetro do corte como as velocidades e a profundidade de corte podem levar a redução no tempo de fabricação e maior vida útil da

máquina, quando utilizada em conformidade com a sua capacidade (RODRIGUES; DINIZ; COPPINI, 1987). Assim, trabalhos que relacionam os parâmetros do processamento têm sido realizados.

Su e Wang (2002) analisaram o efeito do ângulo helicoidal da ferramenta (0° , 2° , 4° , 6° e 8° graus), velocidade de avanço (600 a 4000 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$) e profundidade de corte (1 , 2 , 3 , 4 e 6 mm) durante o processamento em moinho mecânico das madeiras de *Acer saccharum* e de *Cunninghamia lanceolata* no consumo de energia e no tipo de cavaco. A partir das diferentes combinações dos parâmetros de usinagem, os cavacos gerados foram classificados e avaliados, em espessura e tamanho. Os autores observaram que com o aumento da velocidade a porção de cavacos com tamanhos de 20 a 30 Mesh aumentou, esse resultado foi considerado favorável, uma vez que, esse tipo de cavaco indica melhor qualidade da superfície usinada. Quanto ao consumo de energia e velocidade de corte houve alta correlação ($R^2 = 0,94$), quando a velocidade aumentou o consumo diminuiu, para ambas as espécies e em todos os ângulos testados. Quanto ao consumo de energia e a profundidade, também houve alta correlação ($R^2 = 0,98$), conforme a profundidade aumentou o consumo diminuiu para ambas as espécies e em todos os ângulos testados.

Porankiewicz e Tanaka (2007) avaliaram a dependência das forças de corte, do plano de corte, da velocidade de corte e de avanço durante fresagem periférico das madeiras de *Liriodendron tulipifera* ($\rho = 400$ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) e *Cordia alliodora* ($\rho = 456$ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$). Os autores caracterizaram a madeira física e mecanicamente, o intuito foi incluir informações da matéria-prima e do processamento nos modelos matemáticos testados. Os autores geraram bons modelos preditivos da força de corte ($R^2 = 0,98$) e entre os principais resultados a velocidade de corte foi o fator preditivo com maior dependência.

Foi realizado processamento mecânico de madeiras de *Populus tremula* L. em moinho mecânico com velocidades de corte de 30 , 45 e 60 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, velocidades de avanço de $2,5$ e 15 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$, largura de corte de 35 mm e profundidade de corte de 1 mm, para avaliar o efeito dos parâmetros na potência de corte obtida, também foi separado o tipo de lenho (adulto e juvenil) da madeira. Os resultados mostraram que a velocidade de corte e velocidade de avanço foram significativas ($\alpha = 0,05$) à potência de corte, assim como ao tipo de lenho. A potência de corte foi menor no lenho juvenil, para todas as combinações de velocidades e não houve interações. Os autores afirmam que a potência de corte aumenta com o aumento da velocidade de corte, uma vez que, ocorre a diminuição do contato com o dente da ferramenta o que diminui a espessura do cavaco, pequenas espessuras de cavaco têm maior resistência ao corte o que

aumenta a potência exigida (BARCÍK; PIVOLUSKOVÁ; KMINIAK, 2008).

Deus et al. (2018) avaliaram o efeito das velocidades de corte de 804, 603, 402 e 201 m.min⁻¹, velocidade de avanço de 4 m.min⁻¹ e profundidade de corte de 3, 6 e 9 mm, durante fresagem realizada em CNC, na rugosidade da superfície (Ra). Foram utilizados painéis (MDF) com 15 mm de espessura. Os autores concluíram que as velocidades de corte de 804 e 603 m.min⁻¹ com 3 mm de profundidade apresentaram melhor resultado do processamento para obter menores valores de rugosidade.

Os trabalhos têm mostrado a forte e significativa relação dos parâmetros de corte com o processamento, mas ainda é preciso avançar na determinação de valores ideais e na diminuição da variabilidade dos resultados usando técnicas mais sofisticadas de análises.

2.4 Fatores inerentes às máquinas de processamento mecânico

As máquinas de processamento mecânico utilizam motores elétricos para transformar a energia elétrica em energia mecânica e assim realizar trabalho. Durante o processamento mecânico, o motor da máquina de corte pode ter variações no torque (Nm), na potência mecânica (kW) e na energia mecânica (J) requeridos, atreladas aos parâmetros da máquina de corte ou da matéria-prima. O torque é desenvolvido pelo motor para executar o trabalho, como por exemplo, na realização do corte da madeira. O desempenho do motor é igual ao seu rendimento que está relacionado com o torque e com a potência mecânica, que é a taxa de realização de trabalho (SYMON, 1971; ALONSO; FINN, 1972). Parte da energia mecânica é dissipada em forma de calor, parte é exigida para acionar o motor e o restante para executar o corte. A energia específica de corte é a energia mecânica efetiva consumida para remover determinada unidade de volume do material da peça (SALMON, 1992).

Variáveis do processo, como velocidade de avanço e velocidade de corte, número de dentes da ferramenta, rotação do eixo do motor, profundidade de corte entre outras, podem interferir nos fatores exigidos da máquina (energia mecânica, resistência e força do corte) como observado nos trabalhos a seguir.

Orlowski et al. (2009) avaliaram o efeito da umidade e temperatura da madeira e da velocidade de avanço em relação a resistência ao corte durante serragem com serra fita. Foi observado que o aumento na velocidade de avanço causa diminuição da resistência específica ao corte em todas as condições de temperatura (20°C, 5°C e -20°C) das peças investigadas. O aumento na umidade da madeira congelada resultou em valores mais altos de resistência ao

corte, quando a umidade mudou de 12% para 30% e a madeira foi congelada a -20°C , este aumento foi de 10% a 35%, dependendo da alimentação por dente.

Souza et al. (2011) estudaram a influência dos parâmetros de usinagem no consumo de energia específica. O processamento mecânico foi realizado em serra circular com velocidades de corte de 46, 58 e 70 m.s^{-1} , velocidades de avanço de 7,12 e 17 m.min^{-1} e número de dentes 20, 24, 40 e 48, utilizando madeira de dois clones de *Eucalyptus*. Os resultados mostraram que a velocidade de corte de 70 m.s^{-1} produziu média geral mais alta ($4,84 \times 10^{-2} \text{ kJ.cm}^{-3}$) de consumo de energia específica, enquanto a velocidade de corte de 58 m.s^{-1} produziu média mais baixa ($4,16 \times 10^{-2} \text{ kJ.cm}^{-3}$) para cortes longitudinais da madeira de clones de *Eucalyptus*.

Lusth, Grandin e Hellström (2012) determinaram o consumo de energia durante o corte de madeira com picador em duas velocidades de corte e diferentes ângulos de ferramenta. Os autores esperavam que o consumo de energia aumentasse com o aumento do ângulo (ϵ), o que não ocorreu devido à proporção de cavacos que não foram completamente separados formando grandes agregados responsáveis pela maior dissipação de energia.

Silva (2016) avaliou o efeito do sentido do corte em relação as fibras das madeiras de *Corymbria* e *Eucalyptus* em corte utilizando CNC, concluindo que cortes perpendiculares as fibras consumiram maior potência de corte. A combinação das velocidades de avanço de $1,39 \text{ m.min}^{-1}$ e velocidade de corte de $7,54 \text{ m.s}^{-1}$ diminuiu em média 12% de consumo de potência mecânica quando comparada à velocidade de corte de $3,77 \text{ m.s}^{-1}$ e velocidade de avanço de $1,39 \text{ m.min}^{-1}$.

Andrade (2018) realizou estudo do efeito da densidade básica da madeira no consumo de energia específica de corte. A autora utilizou nove espécies e a usinagem foi realizada com fresagem em CNC. A espécie *Hymenaea* spp, apresentou maior consumo (1401 J.cm^{-3}) e a *Toona ciliata* foi a espécie que apresentou o menor consumo (388 J.cm^{-3}). A autora infere que a escolha do material genético a ser processado influencia no valor da energia requerida durante o corte.

Andrade et al. (2018) avaliaram o consumo de energia específica de corte usinando as madeiras de *Khaya ivorensis* e *Khaya senegalensis*. Foram realizados cortes transversais e longitudinais em serra circular com rotações de 2500, 3000 e 3500 min^{-1} e a energia de corte foi obtida por meio de um inversor de frequência. Os autores concluíram que o consumo de energia foi maior para a madeira da espécie *K. senegalensis* tanto no corte longitudinal (10% superior) como no corte transversal (36% superior).

Andrade et al. (2018) estudaram o consumo de energia específica de corte em cinco espécies de madeira nativa da região amazônica. O processamento mecânico foi realizado em plaina desempenadeira com rotação de 4000 min^{-1} e velocidade de avanço de 6 m.min^{-1} . Os valores de energia foram adquiridos por inversor de frequência. O consumo de energia foi diferente entre as espécies, com variação de 0,35%, os valores variaram de 320 a 736 J. cm^{-3} .

Guedes et al. (2020) em experimento realizado em CNC com fresagem periférica, estudaram o efeito da umidade no consumo de energia específica de corte em madeiras com densidades distintas, encontrando como principal resultado o aumento do consumo durante a secagem. A madeira de *Dipteryx alata* teve acréscimo de 70 kJ.cm^{-3} (12%) para queda de 4% na umidade, a madeira de *Goupia glaba* teve acréscimo de 67 kJ.cm^{-3} (13%) para queda de 12% na umidade e a madeira de *Pinus* pp. teve acréscimo 54 kJ.cm^{-3} (11%) para queda de 8% na umidade.

2.5 A rugosidade como forma de avaliar a qualidade da superfície após processamento

A rugosidade é uma característica atribuída aos materiais sólidos que representa as saliências (picos) e reentrâncias (vales) que formam as irregularidades da superfície (NBR ISO 4287, 1998). 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 a flexão e à fadiga, a condução térmica e elétrica, a vedação estática e dinâmica e ao conforto e estética tornando-se uma característica de grande importância para a indústria (WHITEHOUSE, 1994).

A avaliação da rugosidade em materiais é feita segundo normas, como por exemplo, NBR ISO 4287 (2002) e 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 (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).

As normas de avaliação da rugosidade da superfície consideram o estudo de materiais metálicos que assumem o pressuposto de que, a priori, os materiais são homogêneos. No entanto, com a madeira é necessário um estudo mais rigoroso e perspicaz que considere a sua heterogeneidade. Hann (1957) reconheceu a necessidade de controle de qualidade da rugosidade das superfícies de madeira usinadas de acordo com o padrão aceito. Mas, esses

padrões não foram desenvolvidos para superfícies da madeira e as normas gerais existentes, não se mostram tão adequadas (FUNCK et al., 1993; KRISH; CSIHA, 1999; WESTKÄMPER; SCHADOFFSKY, 1995).

As características da superfície após o processamento dependem de parâmetros como a geometria da ferramenta, a direção de corte, a velocidade de corte e de avanço, a profundidade de corte, a força de corte entre outros (KOCH, 1964). A superfície também é modificada com o desgaste de ferramentas (afiação dos gumes de corte), a vibração da máquina, a temperatura, a umidade do ar, a decomposição química da superfície (oxidação e degradação), a podridão biológica e os danos da superfície como resultado da atividade dos insetos (CSANNÁDY; MAGOSS, 2011). Gurau, Mansfield-Williams e Irle (2012) suscitaram indagações sobre a dificuldade de enquadrar madeiras nas normas de materiais em geral e a necessidade de pesquisas e cálculos que expliquem a rugosidade devido as características da madeira. Pesquisas com o intuito de separar a rugosidade da madeira causada por suas características anatômicas, físicas e mecânicas e a rugosidade causada pelo corte têm sido realizadas.

Gurau, Mansfield-Williams e Irle (2005) verificaram a influência das características anatômicas no perfil de rugosidade da superfície de madeiras de Carvalho e Abeto, após lixamento. Equipamentos de medição da rugosidade são dotados, de fábrica, de filtros matemáticos para reduzir os ruídos inerentes das medições, de tal modo, transições abruptas de valores são atenuadas e as ondas da superfície são diferenciadas da rugosidade da superfície propriamente dita. Mas, os autores acreditam que para a madeira é preciso ser criado um novo tipo de filtro que seja sensível as variações anatômicas, ou seja, que separe a rugosidade causada pelas células da madeira da rugosidade provocada pelo processamento. Assim, os autores utilizaram uma nova filtragem utilizando o modelo matemático curvas de Abbot, essa filtragem diferiu valores de ondas atribuídos a variações anatômicas, essas ondas foram eliminadas e a qualificação da superfície lixada para essas espécies foi considerada fidedigna à realidade.

Gurau, Mansfield-Williams e Irle (2007) utilizaram a metodologia de filtragem, desenvolvida em trabalhos anteriores, curva de Abbot, para separar a rugosidade ocasionada pelo processo de lixamento da rugosidade decorrente das estruturas anatômicas. Os autores utilizaram a espécie *Quercus robur*, escolhida por apresentar vasos profundos no lenho juvenil caracterizando uma espécie difícil de analisar a rugosidade, foram realizados lixamentos com lixas de diferentes gramaturas. Os autores mediram a rugosidade e aplicaram modelo matemático para tratamento dos dados. Concluíram que foi possível separar a rugosidade do

processamento das superfícies de madeira lixada das irregularidades anatômicas com um método fornecendo valores mais confiáveis.

Braga et al. (2014) avaliaram a qualidade da superfície da madeira de *Coffea arabica*, a madeira foi processada em plaina desempenadeira em três fases de rotação 2400, 3600 e 4000 rpm e a velocidade de avanço foi de 6 min⁻¹. A avaliação da qualidade foi por meio da avaliação visual, avanço por dente e pelos parâmetros de rugosidade Ra e Rz. Os autores determinaram que a velocidade de corte de 18,85 e 20,94 m.s⁻¹ e velocidade de avanço de 6 m.min⁻¹ apresentaram para essa espécie, qualidade de superfície satisfatória com valores baixos de avanço por dente e de rugosidade.

Andrade et al. (2018) em estudo de duas espécies de mogno avaliou a qualidade da superfície após o processamento mecânico em plaina desempenadeira com rotações de 2400, 3600 e 4000 min⁻¹. Os autores avaliaram a qualidade por meio de rugosidade e avaliação visual. Os resultados mais satisfatórios de avaliação visual foram para a velocidade de avanço de 6 m.min⁻¹ para ambas as espécies, por meio de análise estatística verificou-se que não houve diferença entre espécies para os valores obtidos de rugosidade.

2.6 Otimização de processos pelo método Taguchi

O método Taguchi, também conhecido como projeto robusto, é uma técnica da estatística experimental para analisar processos. O método consolida a ideia de minimizar a influência de fatores ambientais, que via de regra, não são controláveis e são considerados ruídos do processo (TAGUCHI, 1978; LOCHNER; MATAR, 1990). A qualidade de um processo é determinada pelo desvio que a característica de interesse apresenta em relação ao valor esperado da mesma. Fatores como temperatura, umidade, poeira e deterioração são considerados como *ruídos* que causam desvios e resultam na perda da qualidade. Dessa forma, ajustando-se adequadamente os fatores de controle, a influência destes ruídos é mitigada. O método Taguchi é utilizado para avaliar os efeitos de diferentes fatores quando há dois ou mais níveis de variáveis (TAGUCHI, 1978).

O método Taguchi faz uso de um arranjo ortogonal ou cruzado, em que é construído um arranjo envolvendo os parâmetros controláveis e outro com as fontes de ruído. Esses arranjos são cruzados, ou seja, são realizados ensaios com todas as possíveis combinações (ROSS, 1988). Assim, é proposto que se analise a resposta média para cada combinação no arranjo interno e que a variabilidade seja analisada escolhendo uma razão sinal-ruído (SNR) apropriada (TAGUCHI, 1978). A razão sinal-ruído é uma função logarítmica, originada da

indústria de comunicação. Existem três tipos de razão sinal-ruído, já consolidados em literatura, que são empregadas de acordo com o objetivo. O primeiro caso é quando se deseja reduzir a variabilidade em torno de valor nominal, deve-se utilizar a Equação 1. No segundo caso, quando se deseja maximizar os resultados, deve-se utilizar a Equação 2. E por fim, quando pretende-se minimizar os resultados, deve-se utilizar a Equação 3.

$$SNR = 10 \log \left(\frac{\bar{Y}^2}{s^2} \right) \quad (1)$$

$$SNR = -10 \log \left(\frac{\sum \frac{1}{Y^2}}{n} \right) \quad (2)$$

$$SNR = -10 \log \left(\sum \frac{Y^2}{n} \right) \quad (3)$$

Em que: SNR = razão sinal-ruído; Y = variável estudada; \bar{Y} = média; s = variância e n = número de observações.

Van Houts, Bhattacharyya e Jayaraman (2001) aplicaram o método Taguchi em estudo visando verificar a influência de diferentes fatores e interações, durante a confecção de painéis, na tensão interna após a montagem. Os fatores controlados, em diferentes níveis, foram a umidade, a temperatura e a pressão. Por meio do método Taguchi foi traçado o delineamento experimental com oito combinações entre os fatores e níveis. A média dos valores de tensão dos painéis para cada tratamento foi considerada como a variável resposta do experimento. A análise do experimento Taguchi sugere que as tensões residuais em ambos os painéis de 8 mm e 17 mm responderam de maneira semelhante aos diferentes tratamentos e o aquecimento dos painéis a uma temperatura de 60°C por um período de quatro horas foi o fator responsável pela maior redução na tensão residual na compressão das camadas superficiais dos painéis.

Coelho et al. (2008) utilizaram o método Taguchi para avaliar a influência do lixamento e aplainamento na qualidade da superfície das madeiras de faia e de pinheiro. Para o aplainamento foram considerados três níveis de velocidade de corte, de velocidade de avanço e de profundidade de corte. Também foi realizado polimento da superfície com lixa e acabamento

com verniz. A rugosidade da superfície foi determinada com mecanismo de iluminação a laser. A metodologia experimental Taguchi, permitiu avaliar todas as combinações dos fatores durante o processamento e o efeito na qualidade da superfície. A qualidade foi avaliada por meio da análise dos valores da razão sinal-ruído dos coeficientes para as ondulações de superfície (k_{ond}), para a rugosidade (k_{rug}) e para o acabamento (k_{sub}). Assim, os autores definiram que a combinação de velocidade de avanço de $6,5 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, velocidade de rotação 6000 rpm e profundidade de corte de 1mm produziram menores coeficientes (k_{rug} , k_{sub} , k_{ond}) e consequentemente, melhor qualidade de superfície.

Gaitonde, Karnik e Davim (2008) utilizaram os métodos de análise experimental Taguchi e análise de superfície de resposta com objetivo de desenvolver modelo matemático para prever a rugosidade da superfície determinando as condições ideais de corte durante processamento de painéis. Foram confrontados dois níveis de velocidade de corte e quatro níveis de velocidade de avanço. O objetivo do trabalho foi minimizar valores de rugosidade, utilizando a equação proposta por Taguchi que maximiza a relação sinal-ruído para minimizar a rugosidade. A combinação de parâmetros ideal foi de velocidade de avanço de $0,50 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ e velocidade de corte de $452 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. O modelo preditivo de rugosidade, gerado por meio de regressão linear múltipla, obteve coeficiente de determinação de 0,98, que indica grande relação da rugosidade da superfície com as velocidades de corte e valida o modelo.

Sufuoglu (2017), utilizando o método de Taguchi, determinou a combinação de parâmetros ideais para corte em CNC de painéis feitos de *Pinus sylvestris*, objetivando reduzir a rugosidade da superfície dos painéis. Avaliou-se a velocidade de rotação do eixo da ferramenta, a velocidade de avanço, a profundidade de corte e o tipo de folga da ferramenta em três níveis. Foi organizada uma matriz ortogonal com 36 experimentos, avaliando os valores obtidos de razão sinal-ruído para os parâmetros de rugosidade, visando maximizar o valor da SNR. Assim, o autor chegou à velocidade de avanço de $1000 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ e 4 mm de profundidade de corte para diminuir em 2,8 vezes a rugosidade ($R_a \mu\text{m}$).

Melo et al. (2019) otimizaram a energia específica de corte para se obter menor consumo durante o aplainamento da espécie *Pinus taeda*, considerando a umidade como uma variável ruído, ou seja, que deveria ser neutralizada. Foram aplainadas tábuas de Pinus em diferentes condições de umidade: saturadas (100%), em equilíbrio (12%) e secas (0%); e com velocidade de rotação do motor de avanço de 370 a 1800 rpm, velocidade de rotação do motor da plaina de 1500 a 3500 rpm e profundidade de corte de 0,5 a 2,5. Os autores utilizaram o método de estatística experimental erro quadrático médio para calcular a melhor combinação dos

parâmetros para se obter o menor consumo de energia no aplainamento e ter menor influência da umidade das madeiras. Os resultados implicam que o ponto ótimo determinado pelo erro quadrático médio ocorre com a combinação de parâmetros rotação do motor de corte, rotação do motor de avanço e profundidade de corte de 1831,31 rpm, 835,22 rpm e 1,62 mm respectivamente. Assim, o efeito da umidade foi neutralizado e o valor médio de variância foi de $0,140 \text{ J.cm}^{-6}$ e energia específica de corte foi de 284 J.cm^{-3} .

Assim, trabalhos com uso de planejamento experimental em processamento mecânico da madeira estão sendo desenvolvidos, mas os estudos sobre energia específica de corte e formas de otimização ainda precisam ser explorados com técnicas como a metodologia Taguchi.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Material biológico

Três árvores de *Bertholletia excelsa* Bonpl. (Castanheira) e três árvores de *Pinus elliottii* Engeml, foram abatidas para este trabalho em junho de 2018. As árvores eram provenientes de plantio experimental da Universidade Federal de Lavras, localizado no próprio campus. As árvores de *B. excelsa* foram plantadas em janeiro de 1996, as coordenadas geográficas do plantio são 21°13'30" de latitude sul e 44°58'16" de longitude oeste e a altitude de 931 m. O plantio de *P. elliottii* foi implantado em 1998, as coordenadas do plantio são 21°22'32" de latitude sul e 44°97'77" de longitude oeste, altitude de 887 m.

As árvores foram cubadas seguindo a metodologia de *Smalian*, seccionadas em toras ainda no campo com auxílio de motosserra e levadas para a serraria para serem realizados o desdobro e a secagem. O desdobro e a secagem das toras foram realizados na Unidade Experimental de Desdobro e Secagem de Madeira da Universidade Federal de Lavras.

3.2 Análises anatômicas

A caracterização anatômica foi realizada no Laboratório de Anatomia da Madeira da Universidade Federal de Lavras. Para a caracterização macroscópica foi realizado o preparo das superfícies dos corpos de prova (1,5 × 1,5 × 2 cm) com auxílio de micrótomo de deslize. A descrição macroscópica do lenho foi realizada com observação em lupa conta fios com aumento de 10 vezes e as imagens foram obtidas em câmera acoplada ao microscópio estereoscópico.

Foram realizados cortes histológicos com espessura de 18 µm, com o uso de micrótomo de deslize. Os cortes foram clarificados em solução de hipoclorito de sódio PA, desidratados e corados na série: etanol 20% (5 min), coloração com safranina hidro-etilica 1% (5 min), etanol 50% (5 min), 70% (5 min), 90% (5 min), etanol-acetato de butila 3:1 v/v (5 min) e etanol acetato de butila (5 min). Foram preparadas três lâminas permanentes para cada corpo de prova.

Para o preparado do macerado do material, foram retirados fragmentos longitudinais da madeira e colocados em frascos contendo mistura de ácido acético glacial e peróxido de hidrogênio na proporção de 1:1 v/v e levados a estufa a 60°C, por 24 h. O material dissociado foi lavado em água destilada para remoção da solução e corado com safranina hidro-etilica (1%). Para observação dos elementos celulares dissociados foram confeccionadas lâminas

temporárias.

A partir das lâminas dos cortes histológicos e do macerado foi realizada a caracterização qualitativa e quantitativa (IAWA COMMITTEE, 1989). Foi utilizado o *software* Wincell – Pro para fazer a biometria das células e obter as imagens microscópicas. Foram medidos i) elementos de vaso: frequência/mm², diâmetro e comprimento; ii) fibras libriformes: comprimento, espessura da parede e largura do lume; iii) raios: frequência/mm², comprimento em milímetros e largura em número de células iv); traqueídes: comprimento, espessura da parede e largura do lume; v) canais resiníferos: frequência/mm² e diâmetro.

O ângulo da grã foi determinado em três tábuas para cada espécie, utilizando um instrumento riscador. Esse instrumento possui uma agulha de gramofone em uma das extremidades para riscar a madeira e na outra um cabo que direciona o movimento. Assim, na face tangencial foram traçadas com lápis linhas longitudinais, a agulha foi cravada no início de cada linha e com movimento contínuo a agulha foi riscando a madeira até o final da linha acompanhando livremente a grã da madeira. A metodologia utilizada segue Iwakiri (1982) e Silva (2002), os valores de ângulo foram calculados por meio do arco tangente obtido entre a linha central traçada inicialmente e o risco realizado pela agulha que acompanhou o sentido da grã. Foram realizadas 30 medições para cada espécie.

3.3 Análises físicas e mecânicas

Foi realizada amostragem de discos para densidade em diferentes posições do fuste: 100%, 75%, 50%, 25% e 0% em relação à altura comercial (diâmetro até 0,05 m). A densidade básica foi determinada segundo a norma NBR 11941 (ABNT, 2003) e a umidade determinada de acordo com a norma NBR 7190 (ABNT, 2010).

Os ensaios mecânicos de cisalhamento, compressão paralela às fibras e flexão estática foram realizados de acordo com a norma ASTM D143 (ASTM, 2014) e o ensaio de dureza Janka de acordo com a norma BSI 323 (BSI, 1957). Foram realizados os ensaios mecânicos para determinar as propriedades: i) Compressão paralela às fibras, em que foi obtido o Módulo de Elasticidade (MOE) e a resistência máxima; ii) Flexão estática, em que foram obtidos o MOE e o Módulo de Ruptura (MOR); iii) Dureza Janka; iv) Cisalhamento, obtendo a resistência máxima. Os ensaios mecânicos foram realizados com 30 corpos de prova (repetições) para cada árvore, totalizando 90 corpos de prova para cada espécie.

3.4 Aplainamento e aquisição dos dados

O preparo dos corpos de prova, bem como o aplainamento, foi realizado no Laboratório de Usinagem da Madeira da Universidade Federal de Lavras. Foram confeccionadas tábuas radiais com dimensões $50 \times 15 \times 3$ cm. As tábuas foram previamente uniformizadas em plaina desengrossadeira. O experimento foi realizado em plaina desempenadeira (Motor: 2cv/3340 rpm), com controle da profundidade de corte, alimentador mecânico de avanço com inversor de frequência (WEG CFW-08) para controle da velocidade de avanço e controle da velocidade de corte também por meio do inversor de frequência (WEG CFW-08). Os inversores controlam as rotações dos motores da plaina e do alimentador de avanço, contudo, somente aquele ligado ao motor fez a leitura dos dados durante o processamento. Essas informações são transmitidas para o *software* SuperDrive 9.5.1 (FIGURA 1).

Figura 1 – Organização do experimento para aquisição de dados durante o aplainamento.



Legenda: O inversor de frequência, em destaque, controla a velocidade de corte do motor da plaina e coleta os dados para análise.

Fonte: Da autora (2020).

Os valores dos parâmetros velocidade de corte, velocidade de avanço e profundidade de corte utilizados para o aplainamento são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros do aplainamento e níveis utilizados no experimento.

Parâmetros	Níveis	
Velocidade de corte (m.s^{-1})	10	16
Velocidade de avanço (m.min^{-1})	10	22
Profundidade de corte (mm)	1	2

Fonte: Da autora (2020).

A combinação desses parâmetros, bem como o número de experimentos necessários, foi definida por meio do *software* MiniTab, que gerou as combinações que permitem as análises estatísticas. Foram realizados oito aplainamentos totais de três tábuas de *B. excelsa* e três tábuas de *P. elliottii* (TABELA 2).

Tabela 2 – Planejamento do processamento mecânico com as combinações entre parâmetros velocidade de corte, velocidade de avanço e profundidade de corte.

Ordem	Velocidade de corte (m.s^{-1})	Velocidade de avanço (m.min^{-1})	Profundidade do corte (mm)
1	10	10	1
2	16	10	1
3	10	22	1
4	16	22	1
5	10	10	2
6	16	10	2
7	10	22	2
8	16	22	2

Fonte: Da autora (2020).

Após os ensaios foram obtidos pelo inversor de frequência, acoplado à plaina, os dados de torque nominal do motor (kgf.m^{-1}), corrente (A) e tensão (V), que foram utilizados para calcular potência mecânica, energia mecânica e energia específica de corte, demonstrados nas Equações 4, 5 e 6, respectivamente. Os dados foram obtidos pelo *software* de parametrização, sem interrupções, ao longo do tempo. Foram adotadas quatro leituras por segundo.

$$PM = T \times n \times 0,0014 \times 736 \times 1000 \quad (4)$$

$$E = (PM \times C \times Vf) \times 60 \quad (5)$$

$$E_s = \frac{E}{V} \quad (6)$$

Em que:

PM = potência mecânica (kW);

T = torque mecânico do motor (kgf.m⁻¹);

n = rotação (RPM);

E = energia (kJ);

C = comprimento do corte (m);

Vf = velocidade de avanço (m.min⁻¹);

Es = energia específica de corte (kJ.cm⁻³);

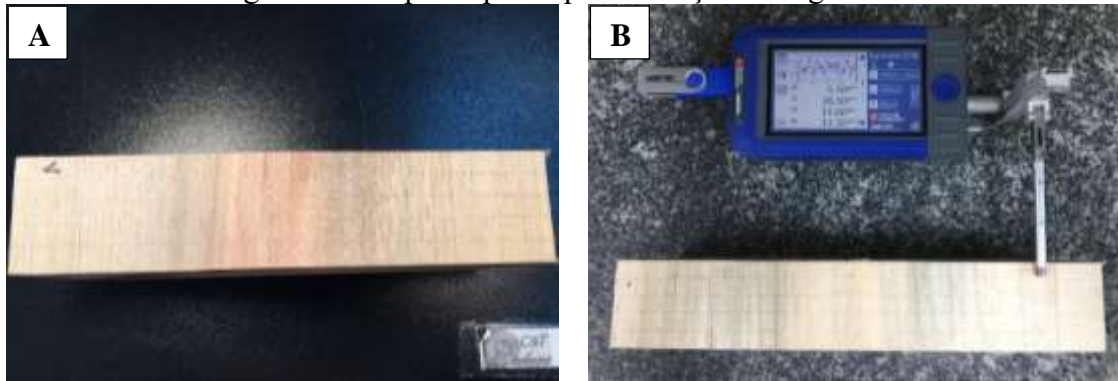
V = volume removido (cm³).

As variáveis de controle deste experimento foram: velocidade de corte, velocidade de avanço e profundidade de corte. Já as variáveis respostas foram: torque (Nm), potência mecânica (kW), energia mecânica (kJ) e energia específica de corte (J.cm⁻³). O experimento foi realizado em arranjo fatorial. Para cada resposta foi feita a análise de variância (ANOVA) para verificar a significância ($\alpha = 0,05$) das variáveis de controle sobre as variáveis resposta. Foram utilizados os *softwares* MiniTab, Rstudio e Solver.

3.5 Análise da qualidade da superfície com rugosímetro e microscopia eletrônica de varredura

Corpos de prova extraídos do pranchão central das madeiras de *B. excelsa* (3 árvores) e de *P. elliotii* (3 árvores) foram processados em plaina desempenadeira com 22 m.min⁻¹ de velocidade de avanço, 10 m.s⁻¹ de velocidade de corte e 1 mm de profundidade de corte. Todas as tábuas receberam o mesmo processamento, em seguida foram cortadas em secções menores, com largura igual ao diâmetro da árvore, espessura de 5 cm e comprimento de 10 cm. A face radial foi dividida, marcada com lápis cópia em malha retangular com dimensões 1 × 2 cm e foi determinada a rugosidade de toda a superfície ao longo da malha (FIGURA 2). Foi utilizado o rugosímetro de arraste Surtronic (Taylor Hobson) com comprimento de amostragem (cut-off) de 8 mm. O parâmetro de rugosidade utilizado nesse trabalho foi o Ra (µm), que é a rugosidade média.

Figura 2 – Corpo de prova para medição da rugosidade.



Legenda: A – Corpo de prova com a marcação de malha retangular de 1×2 cm. B – Determinação da rugosidade em cada retângulo.

Fonte: Da autora (2020).

Os valores de rugosidade medidos foram analisados com uso de estatística descritiva e espacial, esta última para verificar se houve dependência, ou seja, se os valores de rugosidade possuem padrão de acordo com a região em que foram medidos. Para verificar a dependência espacial são calculados os semivariogramas (EQUAÇÃO 7), baseado na premissa de que as medidas de rugosidade separadas por distâncias inferiores são mais semelhantes do que as medidas de rugosidade separadas por distâncias superiores. As análises foram realizadas no *software* RStudio.

$$\bar{Y}(h) = \frac{1}{2 \times N(h)} \times \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(s+h) - Z(s)]^2 \quad (7)$$

Em que: $\bar{Y}(h)$ é o estimador da semivariância populacional entre pares de pontos; $Z(s+h)$ e $Z(s)$ são valores medidos em locais afastados entre si pela distância h ; $N(h)$ é o número de pares de pontos separados pela mesma distância h .

Após a rugosidade ser medida, foram confeccionados corpos de prova para a análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Para esta análise os corpos de prova necessitam ter a mínima dimensão possível, assim, foram cortadas amostras de madeira de 1 cm^3 em serra-fita e posteriormente fragmentados com uso de formão, cada amostra representou uma unidade para cada retângulo da malha em que foi obtida a rugosidade. Essas amostras foram identificadas, ambientadas em câmara climatizada para estabilização da umidade e temperatura, montadas em um *stub* com a face radial para cima e recobertas com camada de ouro. Após o

preparo e montagem a superfície radial das amostras foi visualizada e fotografada no MEV no Laboratório de Microscopia Eletrônica e Análise Ultraestrutural da Universidade Federal de Lavras, localizado no Departamento de Fitopatologia, com equipamento LEO EVO 40 XVP.

3.6 Otimização dos valores de energia específica de corte

Para aplicar o método Taguchi, foi calculada a razão sinal ruído (EQUAÇÃO 3) para as combinações obtidas com o arranjo cruzado das variáveis de controle (velocidade de corte, velocidade de avanço e profundidade de corte), como apresentado na Tabela 3. O arranjo considerou as espécies *B. excelsa* e *P. elliottii* como o ruído e a variável resposta como a energia específica de corte. Isso implica que a otimização pretendeu encontrar os valores ideais das variáveis controle para obter o menor consumo de energia, independente se a espécie que estiver sendo aplainada for *B. excelsa* ou *P. elliottii*. O arranjo cruzado combinou em um único experimento as variáveis de controle e de ruídos. A partir dos valores de SNR calculados foi feita análise de variância para verificar se o modelo ajustado era significativo ($\alpha = 0,05$).

Tabela 3 – Arranjo cruzado do experimento.

Número do experimento	Velocidade de corte (m.s ⁻¹)	Velocidade de avanço (m.min ⁻¹)	Profundidade de corte (mm)	Espécies	
1	10	10	1	<i>B. excelsa</i>	<i>P. elliottii</i>
2	16	10	1	<i>B. excelsa</i>	<i>P. elliottii</i>
3	10	22	1	<i>B. excelsa</i>	<i>P. elliottii</i>
4	16	22	1	<i>B. excelsa</i>	<i>P. elliottii</i>
5	10	10	2	<i>B. excelsa</i>	<i>P. elliottii</i>
6	16	10	2	<i>B. excelsa</i>	<i>P. elliottii</i>
7	10	22	2	<i>B. excelsa</i>	<i>P. elliottii</i>
8	16	22	2	<i>B. excelsa</i>	<i>P. elliottii</i>
9	10	10	1	<i>B. excelsa</i>	<i>P. elliottii</i>
10	16	10	1	<i>B. excelsa</i>	<i>P. elliottii</i>
11	10	22	1	<i>B. excelsa</i>	<i>P. elliottii</i>
12	16	22	1	<i>B. excelsa</i>	<i>P. elliottii</i>
13	10	10	2	<i>B. excelsa</i>	<i>P. elliottii</i>
14	16	10	2	<i>B. excelsa</i>	<i>P. elliottii</i>
15	10	22	2	<i>B. excelsa</i>	<i>P. elliottii</i>
16	16	22	2	<i>B. excelsa</i>	<i>P. elliottii</i>
17	10	10	1	<i>B. excelsa</i>	<i>P. elliottii</i>
18	16	10	1	<i>B. excelsa</i>	<i>P. elliottii</i>
19	10	22	1	<i>B. excelsa</i>	<i>P. elliottii</i>
20	16	22	1	<i>B. excelsa</i>	<i>P. elliottii</i>
21	10	10	2	<i>B. excelsa</i>	<i>P. elliottii</i>
22	16	10	2	<i>B. excelsa</i>	<i>P. elliottii</i>
23	10	22	2	<i>B. excelsa</i>	<i>P. elliottii</i>
24	16	22	2	<i>B. excelsa</i>	<i>P. elliottii</i>

Fonte: Da autora (2020).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Anatomia

Observando o plano transversal da madeira de *Bertholletia excelsa* foi identificado o parênquima axial do tipo em faixas reticulado, porosidade do tipo difusa com vasos em sua maioria solitários, mas com presença de vasos múltiplos (2 e 3), presença de tilose e camadas de crescimento demarcadas por zonas fibrosas. Na Figura 3 observa-se as características anatômicas da espécie de acordo com o plano em visão micro e macroscópica. A madeira de *Pinus elliottii* possui camadas de crescimento distintas com transição abrupta entre lenho inicial e tardio, a espécie também possui canais de resina. Suas características anatômicas de acordo com plano e em visão micro e macroscópicas, são apresentadas na Figura 4. A biometria dos elementos anatômicos das duas espécies encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4 – Valor médio das dimensões e desvio padrão dos elementos anatômicos das espécies *Bertholletia excelsa* e *Pinus elliottii*.

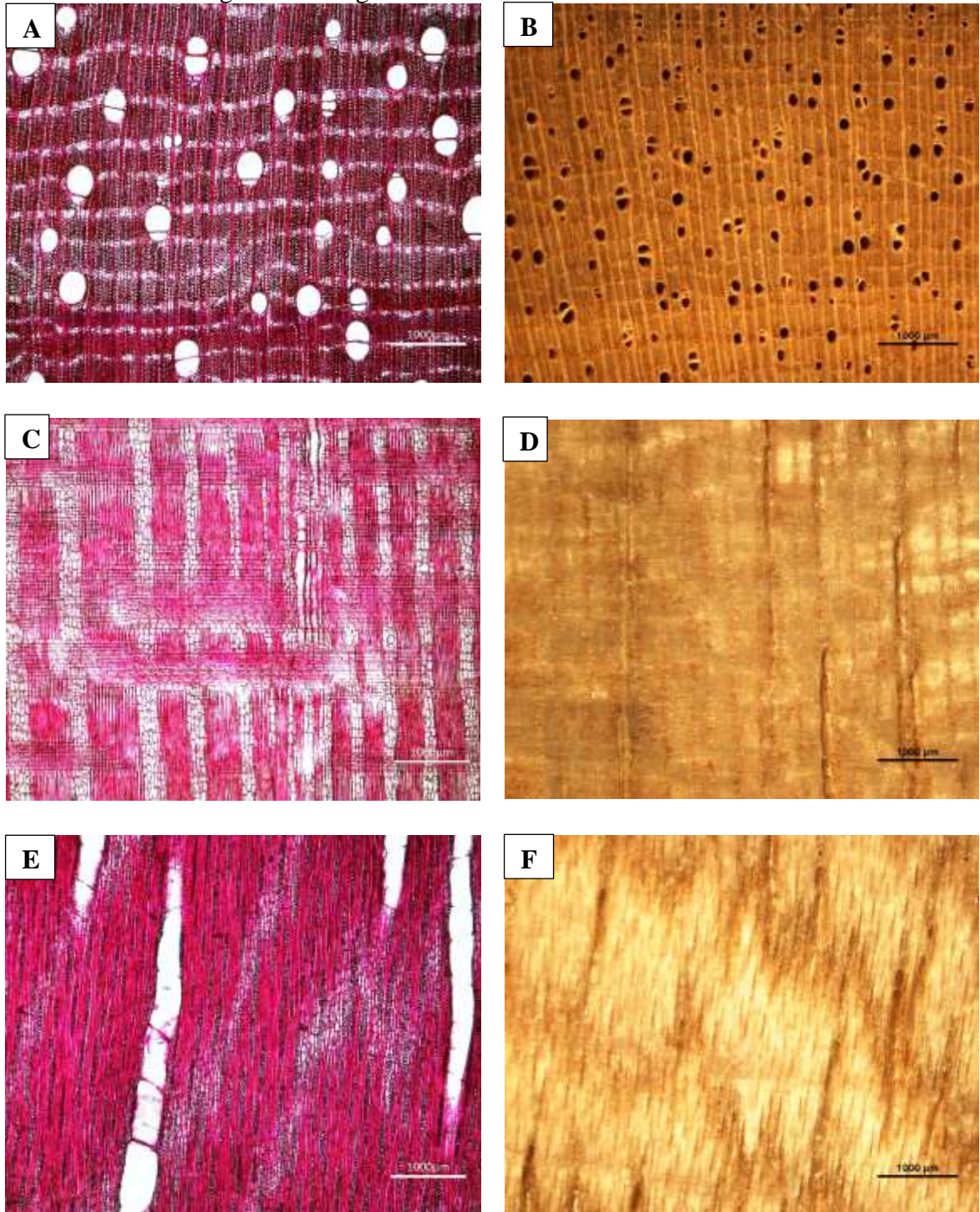
Elementos medidos	<i>B. excelsa</i>	<i>P. elliottii</i>
Comprimento de fibras (μm)	1617,02 \pm 0,155*	-
Comprimento de traqueídes (μm)	-	3258,57 \pm 0,235
Diâmetro de lume (μm)	9,17 \pm 0,001	36,81 \pm 0,009
Espessura de parede (μm)	3,34 \pm 0,001	5,48 \pm 0,002
Fração parede (%)	55 \pm 4,59	33 \pm 9,78
Diâmetro do vaso (μm)	174,35 \pm 0,036	-
Diâmetro do canal resinífero (μm)	-	197,401 \pm 0,029
Comprimento de raios (μm)	211,35 \pm 0,033	466,73 \pm 0,062
Largura de raios (n° de células)	2	1
Frequência de raios (n°/mm ²)	35	12
Frequência de vasos (n°/mm ²)	8	-
Frequência do canal resinífero (n°/mm ²)	-	1

*desvio padrão

Fonte: Da autora (2020).

A estrutura anatômica da madeira tem grande influencia na rugosidade, maior frequência e diâmetro de vasos e de canais resiníferos geram superfícies mais rugosas (CSANÁDY; MAGOS, 2011; GURAU et al., 2005). Os canais resiníferos da madeira de *P. elliottii* são grandes, porém em menor frequência, a frequência de vasos da madeira de *B. excelsa* é alta. A fração parede, importante índice de rigidez da fibra, é maior para a madeira de *B. excelsa*.

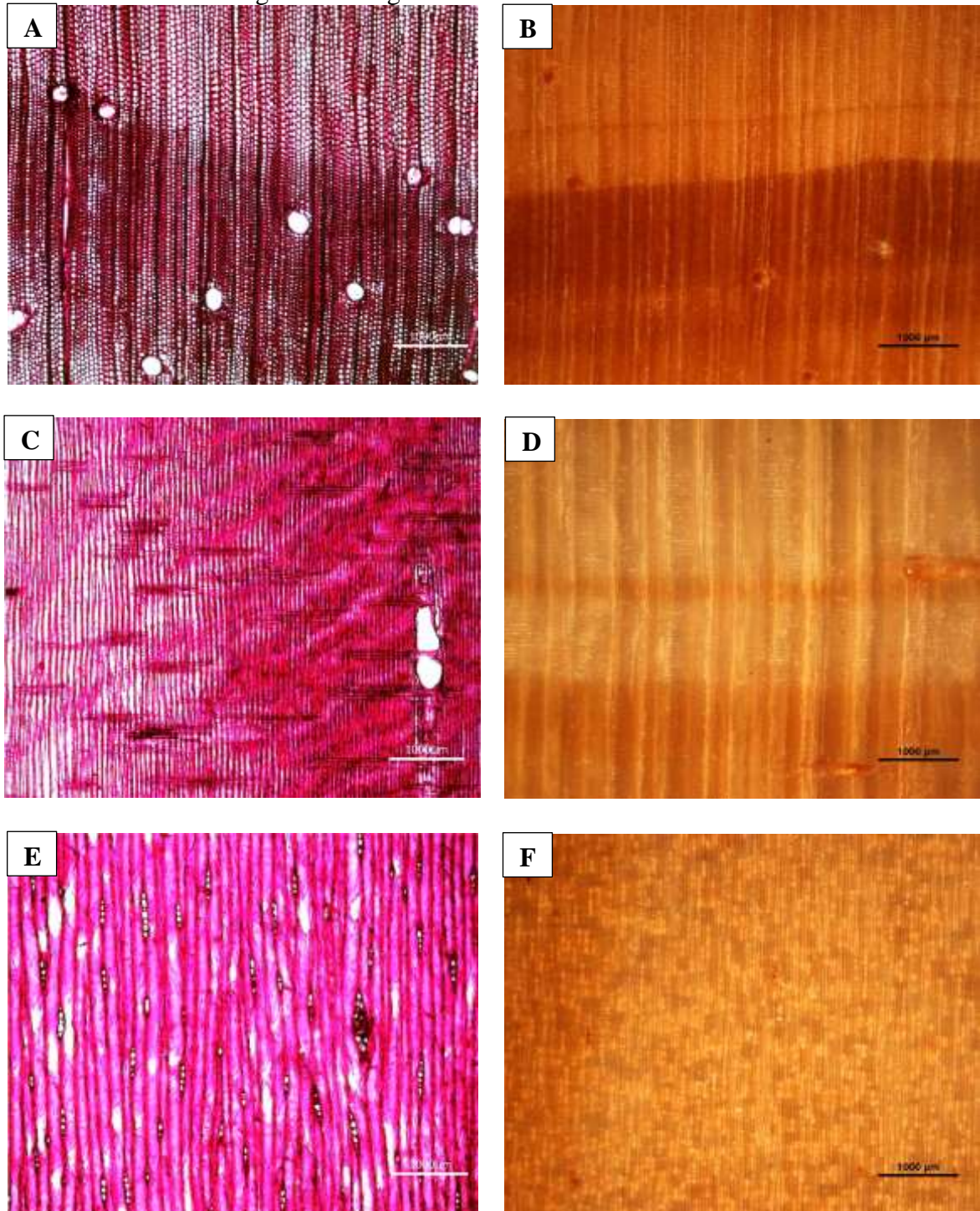
Figura 3 – Imagens da madeira de *Bertholletia excelsa*.



Legenda: A – Plano transversal microscópica. B – Plano transversal macroscópica. C – Plano longitudinal radial microscópica. D – Plano longitudinal radial macroscópica. E – Plano longitudinal tangencial microscópica. F – Plano longitudinal tangencial macroscópica.

Fonte: Da autora (2020).

Figura 4 - Imagens da madeira de *Pinus elliottii*.



Legenda: A – Plano transversal microscópica. B – Plano transversal macroscópica. C – Plano longitudinal radial microscópica. D – Plano longitudinal radial macroscópica. E – Plano longitudinal tangencial microscópica. F – Plano longitudinal tangencial macroscópica.

Fonte: Da autora (2020).

O ângulo médio da grã das árvores de *B. excelsa* utilizadas nesse estudo foi de 8° e o ângulo médio para as árvores de *P. elliottii* foi de 3°. Ambos caracterizam grã direita, com

ângulos muito próximos a 0°. A estatística descritiva dos valores de ângulos para ambas as madeiras se encontra na Tabela 5. Ângulos menores da grã apresentam maior resistência mecânica (YOSHIHARA; OHTA, 2000) e maior resistências ao corte (GOLI et al., 2010). A qualidade da superfície após o corte de espécies com valores menores de grã é considerada melhor (GOLI et al., 2002).

Tabela 5 – Estatística descritiva dos valores de ângulo de grã para as madeiras de *B. excelsa* e *P. elliottii*.

	Média (°)	Máximo (°)	Mínimo(°)	CV%	Número de leituras
<i>B. excelsa</i>	8,40	12	5	17,57	30
<i>P. elliottii</i>	3,03	6	1	30,58	30

Fonte: Da autora (2020).

4.2 Propriedades físicas e mecânicas

Os valores médios de densidade básica para as madeiras de *B. excelsa* e de *P. elliottii* são apresentados na Tabela 6. A média da densidade das espécies obtida nesse trabalho corrobora com informações encontradas em literatura (CARPANEZZI, 1986; INSTITUTO DE PESQUISA TECNOLÓGICA, 1989; NASCIMENTO et al., 1997).

Tabela 6 – Estatística descritiva para os valores de densidade básica das madeiras de *B. excelsa* e *P. elliottii*.

	Média g.cm ⁻³	Máximo g.cm ⁻³	Mínimo g.cm ⁻³	CV%	Número de leituras
<i>B. excelsa</i>	0,587	0,746	0,472	8,69	50
<i>P. elliottii</i>	0,479	0,651	0,327	18,77	50

Fonte: Da autora (2020).

Segundo a classificação sugerida pelo IBAMA (2016), analisando os valores de densidade obtidos nesse trabalho, a madeira de *P. elliottii* é considerada de leve densidade e a madeira de *B. excelsa* de média densidade. Para o processamento mecânico a densidade é um fator importante, uma vez que, interfere na resistência ao corte (KOCH, 1964) madeiras com maior densidade exigem maiores forças durante o corte (GUEDES et al., 2020), no entanto, a densidade não deve ser analisada de forma isolada, outras características da madeira como a

estrutura anatômica influenciam na resistência ao corte (ANDRADE, 2016).

Os valores obtidos nos ensaios de propriedades mecânicas para *B. excelsa* e *P. elliottii* são observados na Tabela 7, onde a *B. excelsa* apresentou valores superiores em relação ao *P. elliottii* em todos os ensaios. Os valores das propriedades mecânicas encontrados para as duas madeiras corroboram com os valores encontrados em literatura (HASELEIN et al., 2000; IPT, 1989; WOOD HANDBOOK, 1987; BAO et al., 2001; SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO, 2010).

Tabela 7 – Resumo das propriedades mecânicas da madeira por espécie.

Espécie	Flexão estática		Compressão paralela		Cisalhamento	Dureza Janka
	MOE kgf.cm ⁻²	MOR kgf.cm ⁻²	MOE kgf.cm ⁻²	Resistência Máxima kgf.cm ⁻²	Resistência kgf.cm ⁻²	kgf.cm ⁻²
<i>B. excelsa</i>	154.388	1.094	74	532	105	656
<i>P. elliottii</i>	137.768	884	65	525	94	377

Fonte: Da autora (2020).

Segundo a classificação do Serviço Florestal Brasileiro (2010) a madeira de *B. excelsa* apresenta dureza média e o *P. elliottii* dureza baixa, essas classificações são referências para entendermos como as madeiras se comportam durante o corte. Na operação de aplainamento a faca de corte aplica sobre a madeira diferentes esforços: flexão, compressão e cisalhamento, os valores determinados mostram que a madeira de *B. excelsa* tem maior resistência a esses esforços.

4.3 Aplainamento

Os valores de torque (Nm), potência mecânica (kW), energia mecânica (kJ) e energia específica de corte (J.cm⁻³) durante o aplainamento da madeira de *B. excelsa* e *P. elliottii* para cada combinação das velocidade de corte (Vc), das velocidade de avanço (Vf) e das profundidade do corte (Pc) e a visão geral dos resultados estão apresentados no Apêndice I. Na Tabela 8 observa-se a estatística descritiva dos resultados obtidos considerando o processamento das duas madeiras. Os valores médios de torque, potência mecânica, energia mecânica e energia específica de corte para a madeira de *B. excelsa* foram superiores quando

comparadas com a madeira de *P. elliottii*.

Tabela 8 – Estatística descritiva dos valores obtidos das variáveis respostas torque, potência mecânica, energia mecânica e energia específica de corte durante o aplainamento das madeiras de *B. excelsa* e *P. elliottii*.

		Torque (Nm)	Potência mecânica (kW)	Energia mecânica (J)	Energia específica de corte (J.cm ⁻³)
<i>B. excelsa</i>	Média	5,69	1,45	300	277
	Erro padrão	0,38	0,10	24	19
	Desvio padrão	1,86	0,47	117	92
	Máximo	9,08	2,63	563	481
	Mínimo	2,26	0,72	127	144
<i>P. elliottii</i>	Média	5,25	1,33	270	257
	Erro padrão	0,35	0,09	17	18
	Desvio padrão	1,69	0,42	82	88
	Máximo	9,08	2,13	431	458
	Mínimo	2,77	0,85	129	132

Fonte: Da autora (2020).

Na análise de variância ($\alpha = 0,05$) foi verificado que os valores de torque, potência mecânica, energia mecânica e energia específica de corte diferiram entre as espécies, os resultados encontram-se na Tabela 9. Essa diferença pode ser atribuída as características anatômicas, físicas e mecânicas intrínsecas das espécies, uma vez que, ambas foram aplainadas da mesma forma. O motor da plaina ao cortar as madeiras da espécie *B. excelsa* teve maior consumo de energia mecânica quando comparado com a espécie *P. elliottii*, esse resultado corrobora com trabalhos em que madeiras com maior densidade, como a *B. excelsa*, consomem maior energia mecânica (MELO et al., 2016; ANDRADE, 2018; MELO et al., 2019; GUEDES et al., 2020).

Tabela 9 – Análise de variância dos valores obtidos de torque, potência mecânica, energia mecânica e energia específica de corte entre as espécies *B. excelsa* e *P. elliotii*.

	Fonte	GL	SQ	QM	Valor F	Valor-P
Torque (Nm)	Espécie	1	2,367	2,367	0,75	0,0392*
	Erro	46	145,583	3,165		
	Total	47	147,950			
Potência Mecânica (kW)	Espécie	1	0,1563	0,1563	0,79	0,0378*
	Erro	46	9,0756	0,1973		
	Total	47	9,2319			
Energia mecânica (J)	Espécie	1	10468	10468	1,02	0,0317*
	Erro	46	470313	10224		
	Total	47	480781			
Energia específica de corte (J.cm ⁻³)	Espécie	1	5059	5059	0,62	0,0434*
	Erro	46	373849	8127		
	Total	47	378908			

GL = grau de liberdade; SQ = soma de quadrados; QM = quadrado médio; Valor-F = valor de F calculado; Valor-p= Valor da probabilidade acima do valor do qui-quadrado calculado.

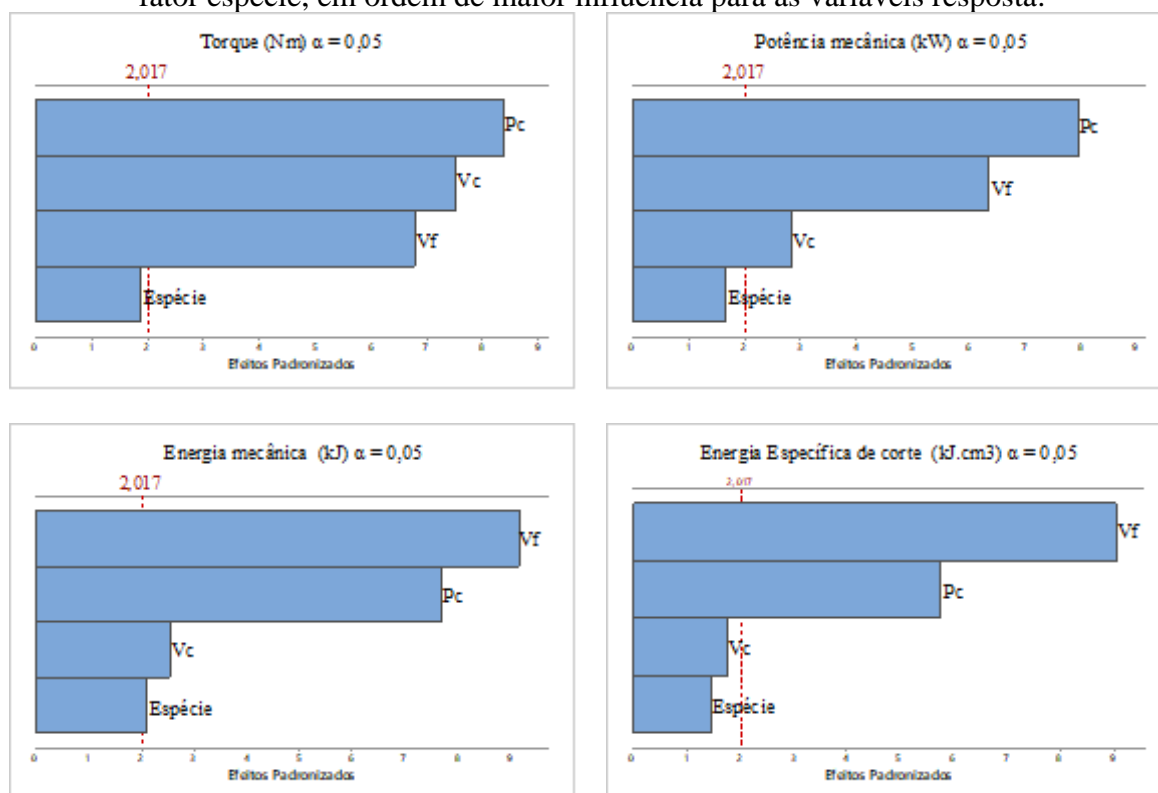
Fonte: Da autora (2020).

4.4 Análise do experimento em fatorial

Por meio da análise do experimento em fatorial foram classificados os fatores preditivos velocidade de corte, velocidade de avanço, profundidade de corte e espécie em como afetaram de forma significativa as variáveis respostas à 5% de significância e seu ranqueamento de acordo com a maior influência nos valores obtidos das variáveis resposta (FIGURA 5).

Observa-se que a profundidade específica (Pc) foi o fator preditivo que mais influenciou os valores de torque e de potência mecânica, e a velocidade de avanço (Vf) foi o fator preditivo que mais influenciou a energia mecânica e a energia específica de corte. O aumento na quantidade de material removido exige mais do motor da plaina. Assim como, o aumento da velocidade com que a peça avança sobre a faca de corte exige mais.

Figura 5 – Diagrama de Pareto em que são elencados os parâmetros de controle da máquina velocidade de corte (V_c), velocidade de avanço (V_f), profundidade de corte (P_c) e o fator espécie, em ordem de maior influência para as variáveis resposta.

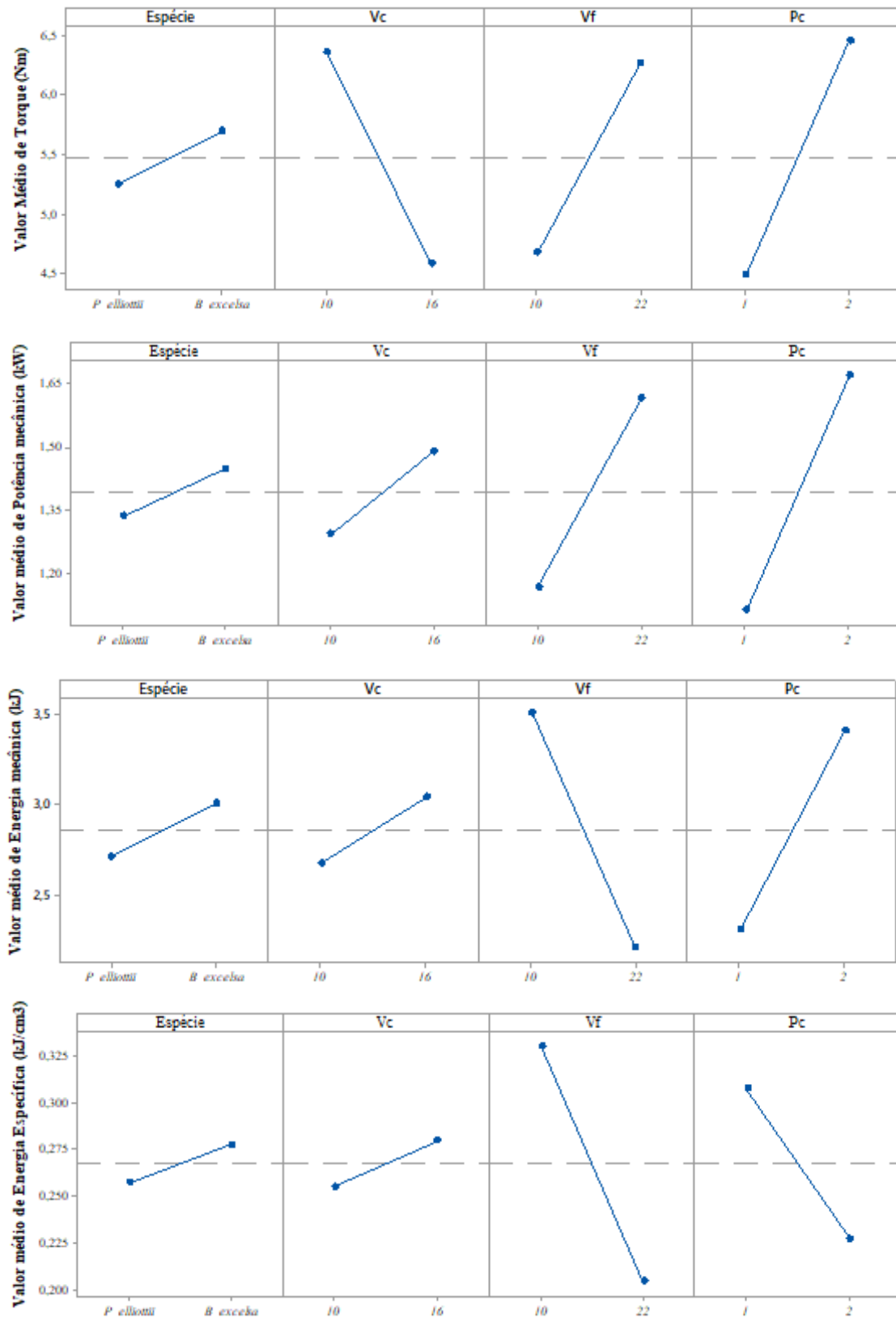


Fonte: Da autora (2020).

Uma vez que, o gráfico de Pareto indica que as variáveis de controle se comportam de forma diferente para cada resposta, foi realizada a análise das variâncias para averiguar quais parâmetros de controle e interações foram significativas. As ANOVAS estão apresentadas no Apêndice II. Observou-se valores altos de coeficiente de determinação ($R^2 > 0,70$) para a relação entre as variáveis controladas, variáveis respostas e para as interações.

Observa-se na Figura 6 os valores médios do torque, potência mecânica, energia mecânica e energia específica de corte do experimento completo. A madeira de *P. elliottii* apresentou para todas as variáveis resposta menores valores. A maior velocidade de corte teve o menor valor de torque requerido e maiores valores de potência, energia mecânica e energia específica de corte requerida. A maior velocidade de avanço teve maior valor de torque e de potência mecânica requerida e menor energia mecânica e energia específica de corte requerida. A maior profundidade de corte teve maior torque, potência e energia mecânica requeridos e menor energia específica de corte requerida.

Figura 6 – Valores médios de torque, potência mecânica, energia mecânica e energia específica de corte de acordo com as variáveis de controle durante o aplainamento.



Fonte: Da autora (2020).

4.5 Análise de regressão para o consumo de energia específica de corte

A análise de variância ($\alpha = 0,05$) dos dados de energia específica de corte requerida durante o processamento em relação aos parâmetros velocidade de corte, velocidade de avanço e profundidade de corte é apresentada na Tabela 10.

Tabela 10 – Análise de variância fatorial dos valores de energia específica de corte obtidos durante o aplainamento das madeiras de *B. excelsa* e *P. elliottii*.

Fonte	GL	SQ	QM	Valor-F	Valor-P
Regressão	4	279162	63791	30,09	0,000
Velocidade de corte (Vc)	1	7263	7263	3,13	0,084
Velocidade de avanço (Vf)	1	189694	189694	81,78	0,000*
Profundidade de corte (Pc)	1	77146	77146	33,26	0,000*
Espécie	1	5059	5059	2,18	0,147
Erro	43	99746	2320		
Falta de ajuste	11	29982	2726	1,25	0,296
Erro puro	32	69764	2180	*	*
Total	47	378908			

GL = grau de liberdade; SQ= soma de quadrados; QM = quadrado médio; Valor-F = valor de F calculado; Valor-p= Valor da probabilidade acima do valor do qui-quadrado calculado

Fonte: Da autora (2020).

Observa-se que os fatores preditivos e o modelo de regressão gerados são significativos. A equação de regressão gerada teve desvio padrão de 0,05 e coeficiente de determinação de $R^2 = 0,73$. Foram gerados modelos para estimar os valores de energia específica de corte, apresentados nas Equações 8 e 9, para as espécies *B. excelsa* e *P. elliottii* respectivamente.

$$Es = 511,8 + 4,10Vc - 10,48Vf - 80,2Pc \quad (8)$$

$$Es = 491,2 + 4,10Vc - 10,48Vf - 80,2Pc \quad (9)$$

Em que: Es = Energia específica de corte ($J.cm^{-3}$); Vc = velocidade de corte; Vf = velocidade de avanço e Pc = profundidade de corte.

Esses modelos podem prever valores de consumo de energia específica de corte para cada madeira a partir dos parâmetros velocidade de corte, velocidade de avanço e profundidade de corte de interesse do operador.

4.6 Análise da qualidade da superfície por meio da rugosidade (Ra) e microfotografias

A rugosidade média (Ra) encontrada para a madeira de *B. excelsa* após aplainamento de superfície foi de 6,51 μm e para a madeira de *P. elliottii* de 6,33 μm . Embora os valores médios estejam próximos, analisando a Tabela 11 com a estatística descritiva, observa-se que o coeficiente de variação foi alto para as duas madeiras e que a amplitude dos valores é alta.

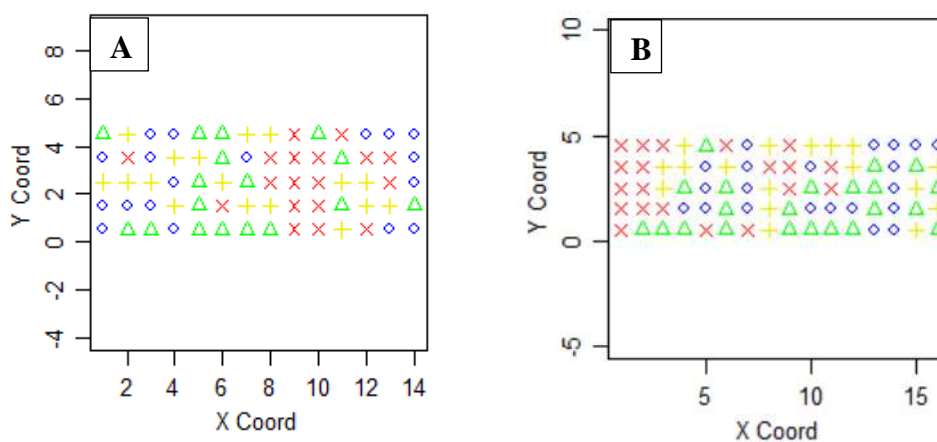
Tabela 11 – Estatística descritiva dos valores de rugosidade média Ra obtidos após o aplainamento das madeiras de *B. excelsa* e de *P. elliottii*.

	Média	Máximo	Mínimo	Coeficiente de variação	N
<i>B. excelsa</i>	6,51	14,30	2,60	29%	50
<i>P. elliottii</i>	6,33	13,10	1,20	35%	50

Fonte: Da autora (2020).

O teste de dependência espacial apresentou resultado não significativo, ou seja, não houve padrão nos valores de Ra ao longo da distribuição espacial dos corpos de prova como esperado (FIGURA 7). Assim, as madeiras aplainadas com os mesmos parâmetros de processamento tiveram variações de rugosidade dentro da mesma tábua, para as duas espécies. Isso representa que a rugosidade resulta não apenas do aplainamento uniforme, mas das características da madeira.

Figura 7 – Distribuição espacial dos valores de rugosidade média (Ra) para as madeiras de *B. excelsa* (8A) e de *P. elliottii* (8B).



Legenda: As cores representam valores de rugosidade (Ra μm) do maior para o menor em que: vermelho > azul > verde > amarelo.

Fonte: Da autora (2020).

As imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura da madeira de *B. excelsa* após o aplainamento da superfície são observadas na Figura 8. O valor de rugosidade apresentado pela superfície na imagem 8A foi de $R_a = 3,38 \mu\text{m}$ e 8B foi de $R_a = 3,80 \mu\text{m}$, ambos os valores para esse tipo de aplainamento são considerados baixos e indicam uma superfície mais regular.

A superfície observada na microfotografia 8C apresentou valor de $R_a = 7,9 \mu\text{m}$, esse valor é considerado alto em comparação com a média, por isso, foi realizada imagem com maior ampliação em que se constatou arrancamento parcial das fibras (como indicado na imagem). Parte das paredes celulares permanecem, após o arrancamento feito pela faca de corte, o que aumenta o pico a ser percorrido pela agulha do rugosímetro e expõe células de raio, provavelmente a agulha do rugosímetro pode ter passado por dentro desse raio causando vale de maior profundidade.

Na microfotografia 8D, a superfície observada também apresentou alto valor de rugosidade $R_a = 9,30 \mu\text{m}$, com a ampliação da superfície vemos que houve dilaceração da superfície com o corte e levantamento de fibras (como indicado na imagem).

Observou-se na microfotografia 8E uma superfície que apresentou valor de $R_a = 7,2 \mu\text{m}$, verificando-se a presença de raios, em que, se for considerado que os raios possuem cavidades menores quando comparados com as fibras e com os vasos é compreensível a menor rugosidade quando comparado com a microfotografia 8C e 8D.

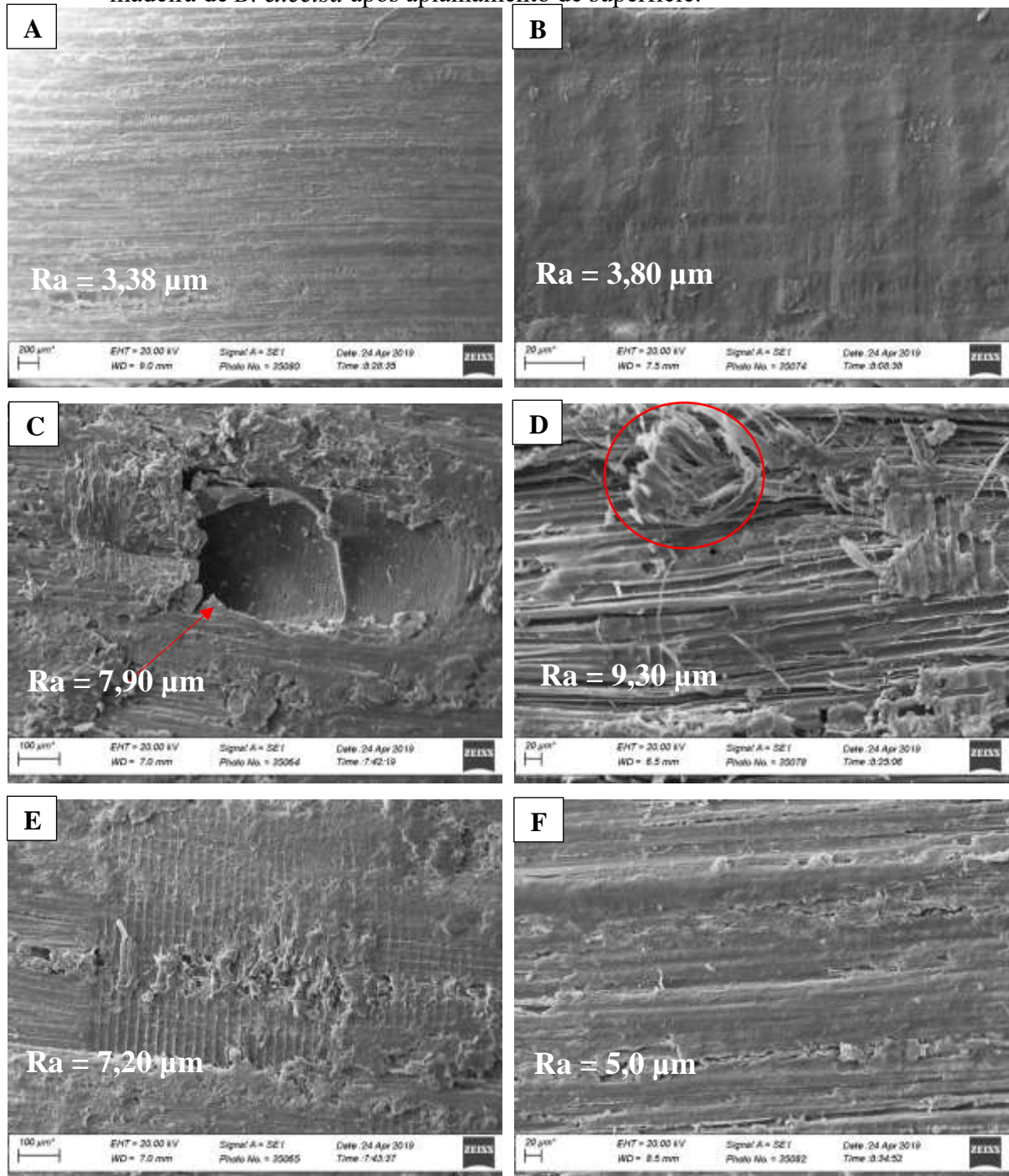
A superfície observada na microfotografia 8F apresentou $R_a = 5,0 \mu\text{m}$, nota-se aspectos melhores decorrentes da menor rugosidade, no entanto existe um aspecto de compressão das células. Observa-se que as superfícies de *B. excelsa* apresentam arrancamentos e levantamento das fibras.

Observa-se na Figura 9 as imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura da madeira de *P. elliotii* após o aplainamento da superfície. O valor de rugosidade da superfície apresentada em 9A foi de $4,20 \mu\text{m}$, pode-se perceber o desnivelamento na superfície formando irregularidades. Em 9B e 9C têm-se os valores de R_a de $7,80 \mu\text{m}$ e $7,30 \mu\text{m}$ respectivamente, nota-se que os raios estão expostos em alguns locais e a superfície não é regular. Nas superfícies 9D, 9E e 9F os valores de rugosidade são $8,80 \mu\text{m}$, $13,10 \mu\text{m}$ e $10,20 \mu\text{m}$ respectivamente. Em 9E e 9F a superfície foi ampliada, para evidenciar as falhas da superfície. A estrutura anatômica encontra-se em partes dilaceradas. As pontoações areoladas dos traqueídes foram expostas, em destaque na Figura 9E e 9F.

A madeira de *P. elliotii* (baixa densidade e dureza) tem menor resistência ao corte e causa menos arrancamentos e levantamentos de traqueídes. Já a madeiras de *B. excelsa* (média densidade) se torna mais resistente ao corte e causam maior levantamento e arrancamento de fibras. Madeiras de coníferas apresentam características favoráveis ao corte, é possível atingir padrões altos de qualidade de superfície (CSANÁDY; MAGOS, 2011).

A faca de corte em contato com a superfície comprime e corta as fibras e os traqueídes da madeira. No entanto, por ser heterogênea, o contato da faca com a madeira terá resultado diferente de acordo com a área atingida. Em um mesmo corpo de prova têm-se diferentes rugosidades de acordo com o tipo de corte e o ângulo da ferramenta que atinge a madeira. A densidade da madeira e a resistência mecânica são importantes fatores no resultado da qualidade final. O ângulo da grã, de ambas as espécies é classificado como direito, não interferindo de forma incisiva no aplainamento das superfícies e na rugosidade.

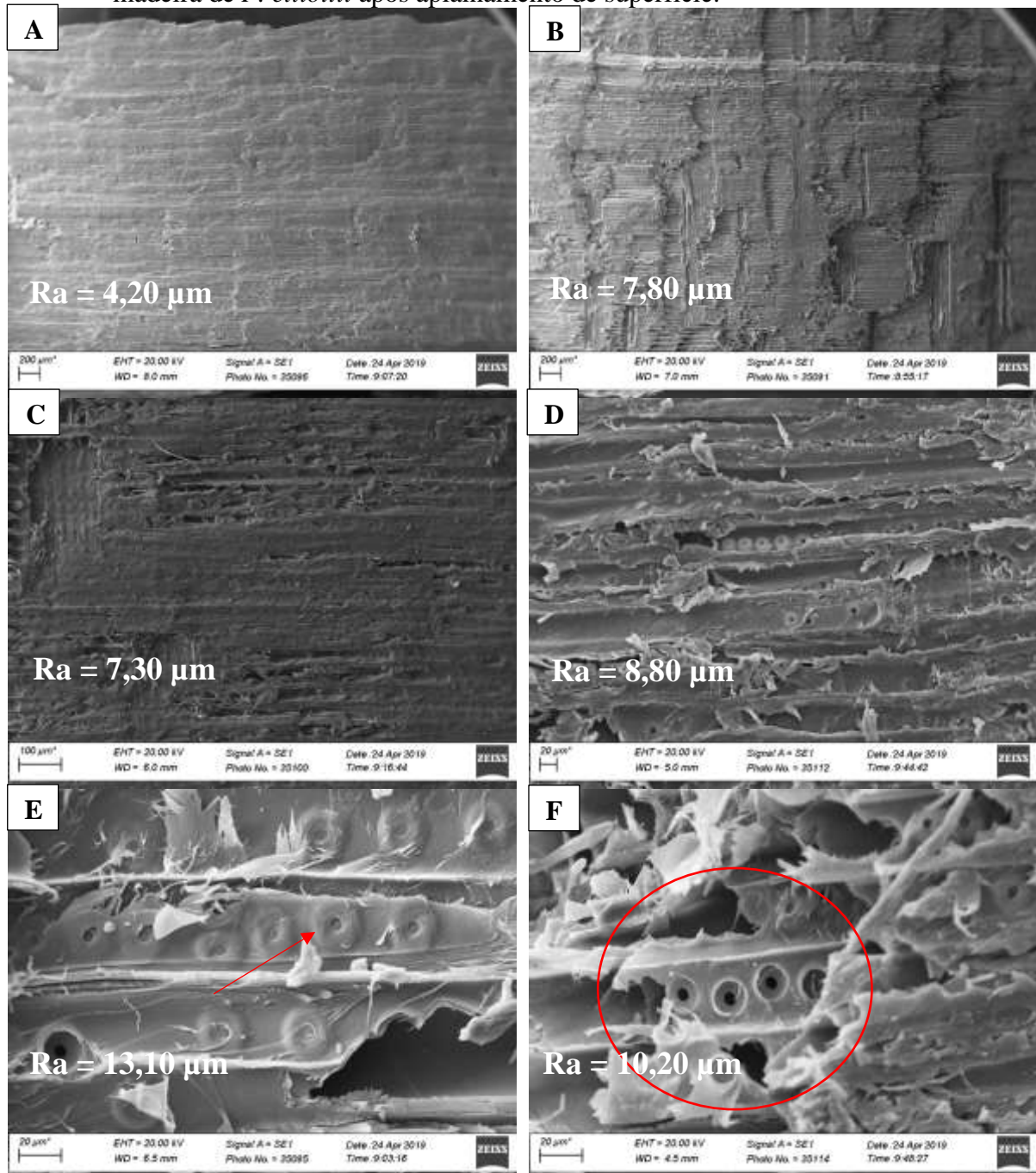
Figura 8 – Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura das superfícies radiais da madeira de *B. excelsa* após aplainamento de superfície.



Legenda: A – Superfície regular. B – Superfície regular. C – Arrancamento parcial da fibra. D – Dilaceração da superfície. E – Raios expostos. F – Superfície comprimida.

Fonte: Da autora (2020).

Figura 9 – Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura das superfícies radiais da madeira de *P. elliottii* após aplainamento de superfície.



Legenda: A – Superfície regular. B – Raios expostos. C – Raios expostos. D – Dilaceração da superfície. E – Detalhe das pontoações aparentes. F – Detalhe das pontoações aparentes.

Fonte: Da autora (2020).

4.7 Otimização da energia específica de corte pelo método Taguchi

Foi aplicado o método Taguchi para otimização dos valores de energia específica de forma a identificar valores ótimos, ou seja, valores de parâmetros (V_c , V_f e P_c) para obter

menor valor de energia específica de corte nas duas espécies em conjunto. Os valores mais elevados da razão sinal-ruído identificam as definições do fator de controle que minimizam os efeitos dos fatores de ruído, assim para ambas as espécies foram definidos os mesmos fatores de controle (TABELA 12).

Tabela 12 – Planejamento experimento ortogonal para consumo de energia específica de corte.

Velocidade de corte (m.s ⁻¹)	Velocidade de avanço (m.min ⁻¹)	Profundidade de corte (mm)	Energia específica <i>B. excelsa</i>	Energia específica <i>P. elliotii</i>	Média	Desvio Padrão	SNR
10	10	1	481	458	4,70	1,60	26,56
16	10	1	456	357	4,07	6,98	27,75
10	22	1	194	111	1,53	5,90	36,35
16	22	1	170	329	2,50	1,13	31,63
10	10	2	294	245	2,70	3,46	31,35
16	10	2	332	287	3,10	3,17	30,16
10	22	2	144	172	1,58	1,99	35,99
16	22	2	239	174	2,06	4,64	33,60
10	10	1	388	351	3,69	2,66	28,64
16	10	1	369	415	3,92	3,24	28,13
10	22	1	262	110	1,86	1,07	33,94
16	22	1	259	171	2,15	6,16	33,18
10	10	2	246	169	2,08	5,42	33,51
16	10	2	376	283	3,29	6,53	29,56
10	22	2	170	132	1,51	2,64	36,01
16	22	2	173	193	1,83	1,41	34,76
10	10	1	350	343	3,47	5,49	29,20
16	10	1	289	355	3,22	4,64	29,80
10	22	1	214	110	1,62	7,37	35,37
16	22	1	271	254	2,63	1,21	31,61
10	10	2	318	212	2,65	7,53	31,36
16	10	2	276	263	2,70	9,31	31,37
10	22	2	164	171	1,67	4,60	35,02
16	22	2	216	194	2,05	1,54	33,77

Fonte: Da autora (2020).

A análise de variância (TABELA 13) dos valores de energia específica de corte e da razão sinal-ruído foram significativos ($\alpha = 0,05$), todos os termos considerados para o modelo foram significativos, confirmando que o modelo gerado para prever a razão sinal-ruído é confiável.

Tabela 13 – Análise da variância dos valores de energia específica de corte pelo arranjo ortogonal de Taguchi.

Fonte	GL	SQ	QM	Valor-F	Valor-P
Modelo	7	176,660	25,240	25,160	0,000*
Linear	3	164,190	54,730	54,570	0,000*
Velocidade de corte	1	14,260	14,260	14,220	0,002*
Velocidade de avanço	1	122,900	122,900	122,540	0,000*
Profundidade de corte	1	27,030	27,030	26,960	0,000*
Interações de 2º ordem					
Velocidade de corte × Velocidade de avanço	1	4,860	4,860	4,850	0,040*
Erro	16	16,050	1,000		
Total	23	192,710			

GL = grau de liberdade; SQ = soma de quadrados; QM = quadrado médio; Valor-F = valor de F calculado; Valor-p= Valor da probabilidade acima do valor do qui-quadrado calculado.

Fonte: Da autora (2020).

O modelo gerado (EQUAÇÃO 10) para aplainamento das duas espécies em conjunto apresentou coeficiente de determinação de $R^2 = 0,91$.

$$SNR = 241 + 134V_c + 175V_f + 1450P_c - 9,14V_c \times V_f - 7,01V_f \times V_c + 4,43V_c \times V_f \times P_c \quad (10)$$

Em que: V_c = velocidade de corte; V_f = velocidade de avanço; P_c = profundidade de corte.

Após maximizar o valor de SNR chegou-se nos parâmetros ótimos para minimizar o consumo de energia específica para ambas as espécies. A velocidade de corte de 10 m.s^{-1} , velocidade de avanço de 22 m.min^{-1} e a profundidade de corte de 1 mm .

5 CONCLUSÃO

Com este trabalho foi possível concluir que durante o aplainamento das madeiras de *Bertholletia excelsa* e *Pinus elliottii* existem variações no consumo de energia mecânica, de energia específica de corte, de torque e de potência mecânica requeridos pelo motor da plaina. As variações podem ser explicadas pelas diferenças anatômicas, mecânicas e físicas existentes entre as madeiras.

Pelo método de otimização Taguchi foram encontrados valores ótimos para reduzir o consumo de energia específica para as duas espécies durante o aplainamento. Os valores definidos foram: velocidade de corte de 10 m.s⁻¹, velocidade de avanço de 22 m.min⁻¹ e 1 mm de profundidade de corte.

Foram gerados modelos matemáticos lineares ($R^2 = 0,71$) para prever o consumo de energia específica de corte durante o aplainamento das espécies *B. excelsa* e *P. elliottii* em conjunto.

Não houve dependência espacial nos valores de rugosidade média (Ra) após o aplainamento das madeiras. Os valores de rugosidade medidos tiveram alta variação dentro dos mesmos corpos de prova. Por meio das microfotografias de microscopia eletrônica de varredura constatou-se que a anatomia, pode explicar a variação da rugosidade na mesma madeira.

Espera-se que trabalhos futuros utilizem diferentes ferramentas de planejamento experimental em processamentos mecânicos realizados em serra circular, tupia e furadeiras em busca de otimizar os processos e aumentar o rendimento e a qualidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALONSO, M.; FINN, E. J. **Física: um curso universitário**. São Paulo: Edgard Blücher. 1972.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D143: Standard methods of testing small clear specimens of timber**. Filadélfia, Estados Unidos da América. 2014. 31 p.

ANDRADE, A. C. A. **Investigação da energia de corte em madeiras de diferentes densidades básicas**. Tese (Doutorado acadêmico) – Universidade Federal de Lavras – Lavras, 2018.

ANDRADE, A. C. A. et al. Analysis of specific cutting energy in planing of native species of Brazil for solid product purpose. **Australian journal of basic and applied sciences**, v.12, p. 27-30, 2018.

ANDRADE, A. C. A.; et al. Quality of machined surfaces and specific cutting energy in wood of two African mahogany species. **Scientia Forestalis**, v.46, n.120, p. 532-539, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941-02: Determinação da densidade básica em madeira**. Rio de Janeiro, Brasil. 2003. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190

BAO, F. C. et al. Differences in wood properties between juvenile wood and mature wood in 10 species grown in China. **Wood Science and Technology**, v.35, p. 363-375, 2001.

BARCÍK, Š.; PIVOLUSKOVÁ, E.; KMINIAK, R. Effect of technological parameters and wood properties on cutting power in plane milling of juvenile poplar wood. **Drvna Industrija: Znanstveni časopis za pitanja drvne tehnologije**, v.59, n.3, p.107-112, 2008.

BONDUELLE, A.; CRUZ, C. R.; SILVA, J. R. M. **Processo mecânico da madeira**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2002.

BRAGA, P. P. C. et al. Qualidade da superfície de madeira de *Coffea arabica*. **Cerne**, v.20, n.1, p. 21-28, 2014.

BRASIL. **Lei no 12.651, de 25 de maio de 2012**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis no 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis no 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória no 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/L12651compilado.htm. Acesso em: 01 mar 2016.

BRITISH STANDARD INSTITUTION. **BSI 373: Methods of testing small clear specimens of timber**. London, 1957.

BROWN, H. P.; PANSWIN, A. J.; FORSAITH, C. C. **Textbook of wood technology**. New York: McGraw-Hill, 1952. 783 p.

- BURGER, L. M.; RICHTER, H. G. **Anatomia da madeira**. São Paulo: Nobel, 1991. 154 p.
- CARPANEZZI, A. A. et al. Zoneamento ecológico para plantios florestais no estado do Paraná. Brasília: **EMBRAPA**, CNPF, Documentos, n. 17, p. 89, 1986.
- CHUCHALA, D. et al. The effect of wood provenance and density on cutting forces while sawing Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). **BioResources**, v.9, n.3, p.5349-5361, 2014.
- COELHO, C. L. et al. Method for evaluating the influence of wood machining conditions on the objective characterization and subjective perception of a finished surface. **Wood science and technology**. v.42, n.3, p.181-195, 2008.
- CSANÁDY, E.; MAGOSS, E. Mechanics of wood machining. **Springer Science & Business Media**. 2011. 243 p.
- DEUS, P. R. et al. Analysis of the Cutting Parameters in Front Milling for Medium Density Fiberboard. **BioResources**, v.13 n.2, p.3404-3410, 2018.
- DI FULVIO, F.; ERIKSSON, G.; BERGSTRÖM, D. Effects of wood properties and chipping length on the operational efficiency of a 30 kW electric disc chipper. Croatian Journal of Forest Engineering: **Journal for Theory and Application of Forestry Engineering**, v.36, n.1, p.85-100, 2015.
- EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Espécies de Pinus mais plantadas no Brasil**, 2014. Disponível em: <https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo?p_p_id=conteudoportlet_WAR_sistemasdeproducaoI6_1galceportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_count=1&p_r_p_-76293187_sistemaProducaoId=3715&p_r_p_-996514994_topicoId=3229>. Acesso em: 12 jul. 2019.
- EYMA, F.; MÉAUSOONE, P. J.; MARTIN, P. Study of the properties of thirteen tropical wood species to improve the prediction of cutting forces in mode B. **Annals of forest science**, v.61, n.1, p.55-64, 2004.
- FIEDLER, N. C.; SOARES, T. S.; SILVA, G. F. Produtos florestais não madeireiros: importância e uso sustentável da floresta. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, v.10, n.2, p. 263-278, 2008.
- FRANZ, N. C. **An analysis of the wood cutting process**. PhD thesis, University of Michigan Press, Ann Arbor, MI. Franz, N. C. An analysis of the wood-cutting process, 1958, 168 p.
- FUNCK, J. W. et al. Measuring surface roughness on wood: a comparison of laser scatter and stylus tracing approaches. **SPIE**. v.182, p.1173-184, 1993.
- GAITONDE, V. N.; KARNIK, S. R.; DAVIM, J. P. Prediction and minimization of delamination in drilling of medium-density fiberboard (MDF) using response surface methodology and Taguchi design. **Holzforschung**. v.62, n.2, p.209-214, 2008.
- GAUZIN-MÜLLER, D.; MARTINS, A; WISNIK, G. **Madeira como Estrutura: A história da Ita**. Paralaxe, 2005.

GOLI, G. et al. Surfaces formation and quality in moulding wood at various grain angles. Initial results with Douglas fir and Oak. In: **Proceedings of the IUFRO Symposium: Wood Structure and Properties**. 2002. p. 1-3.

GOLI, G. et al. Up-milling and down-milling wood with different grain orientations—the cutting forces behaviour. **European journal of wood and wood products**, 68(4), 385-395, 2010.

GUEDES, O. T. et al. Cutting energy required during the mechanical processing of wood species at different drying stages. **Maderas. Ciencia y Tecnologia**. v.22, n.4, 2020.

GURAU, L.; MANSFIELD-WILLIAMS, H.; IRLE, M. Processing roughness of sanded wood surfaces. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v.63 n.1, p.43-52, 2005.

GURAU, L.; MANSFIELD-WILLIAMS, H.; IRLE, M. Separation of processing roughness from anatomical irregularities and fuzziness to evaluate the effect of grit size on sanded European oak. **Forest Products Journal**, v.57, n.1-2, p.110-116, 2007.

GURAU, L.; MANSFIELD-WILLIAMS, H.; IRLE, M. The influence of measuring resolution on the subsequent roughness parameters of sanded wood surfaces. **European Journal of Wood and Wood Products**, v.71 n.1, p.5-11, 2012.

HANN, R. A. A method of quantitative topographic analysis of wood surfaces. **Forest Products Journal**, v.7 n.12, p.448-452, 1957.

HASELEIN, C. R. et al. Características estruturais da madeira de *Pinus elliottii* Engelm aos 30 anos de idade. **Ciência Florestal**, v.10, n.2, p.135-144, 2000.

HERNANDEZ-CASTANEDA, J. C.; SEZER, H. K.; LI, L. The effect of moisture content in fibre laser cutting of pine wood. **Optics and Lasers in Engineering**, v.49, n.9-10, p.1139-1152, 2011.

IAWA Committee. **List of microscopic features for hardwood identification**. IAWA Bulletin 10(3): 219-332. 1989.

IBAMA – INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS RENOVÁVEIS. **Banco de dados de madeiras brasileiras**. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br>>. Acesso em: 15 abr. 2019.

ISO 4287. Geometrical product specifications (GPS). **Surface texture. Profile method. Terms. Definitions and surface texture parameters**. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland. 2002.

ISO 4288. Geometrical product specifications (GPS) - **Surface texture: profile method - Rules and procedures for the assessment of surface texture**. British Standards Institute, London 2008.

IWAKIRI, S. **Classificação de madeiras tropicais através do método mecânico não destrutivo**. Dissertação (Mestrado acadêmico) – Universidade Federal do Paraná – Curitiba. 1982.

- KOCH, P. **Wood Machining Process**. New York: Ronald Press Company, 1964. 530 p.
- KOLLMANN, F. F. P.; CÔTÉ, W. A. **Principles of wood science and technology: solid wood**. v.1. New York: Sprigerm, 1968.
- KRETSCHMANN, D. E.; GREEN, D. W. Modeling moisture content-mechanical property relationships for clear southern pine. **Wood and fiber science**, v.28, n.3, p.320-337, 2007.
- KRISCH J.; CSIHA C. Analysing wood surface roughness using an S3P perthometer and computer-based data processing. In: **Proc XIII Sesja Naukowa Badania dla Meblarstwa**. Poland, 1999.
- KRONKA, F. J. N; BERTOLANI, F., PONCE, R. H. **A cultura do Pinus no Brasil**. Sociedade Brasileira de Silvicultura, 2005.
- LAINA, R. et al. Effect of the anatomical structure, wood properties and machining conditions on surface roughness of wood. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v.19, n.2, p.203-212, 2017.
- LOCHNER, R. H.; MATAR, J. E. **Designing for quality. An introduction to the best of Taguchi and western methods of statistical experimental design**. Quality resources, New York. 1990, p.23-75.
- LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. Nova Odessa, SP: Ed. **Plantarum**, 2002. 149 p.
- LUSTH, H.; GRADIN, P. A.; HELLSTRÖM, L. M. Chemical pulping: The dependency of energy consumption on cutting angles in the canter chipping process. **Nordic Pulp & Paper Research Journal**, v.27, n.5, p.886-889, 2012.
- MAHR GMBH. Mahr Perthomer. **Surface Texture Parameters**, new standart DIN em ISO/ASME. 1999.
- MCKENZIE, W. M. **Fundamental analysis of the wood-cutting process**. 1961.
- MELO, D. J. et al. Robust optimization of energy consumption during mechanical processing of wood. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 77, n. 6, p. 1211-1220, 2019.
- MELO, L. E. L. et al. Study of the physical properties of *Corymbia citriodora* wood for the prediction of specific cutting force. **Scientia Forestalis**, v.111, p.701-708, 2016.
- MELO, L. E. L. et al. Influence of anatomy and basic density on specific cutting force for wood from *Corymbia citriodora* Hill & Johnson. **Forest systems**, v.24, n.3, p.4, 2015.
- MORI, S. A.; PRANCE, G. T.; DE ZEEUW, C. H. *Lecythidaceae*, Part 2. The zygomorphic-flowered new world genera (*Couroupita*, *Corythophora*, *Bertholletia*, *Couratari*, *Eschweilera*, & *Lecythis*), with a study of secondary xylem of neotropical *Lecythidaceae*. New York, NY: **New York Botanical Garden**, 1990. 373 p.
- MULLER, C. H. et al. A cultura da castanha-do-brasil. **EMBRAPA**, Brasília, 1995, 65 pp.

NASCIMENTO, C. C.; GARCIA, J. N.; DIÁZ, M. P. Agrupamento de espécies madeiras da amazônia em função da densidade básica e propriedades mecânicas. **Madera y Bosques**, v.3, n.1, p. 33-52, 1997.

NASCIMENTO, D. F. R. et al. Effect of moisture content on specific cutting energy consumption in *Corymbia citriodora* and *Eucalyptus urophylla* woods. **Scientia Forestalis**, v.45, n.113, p.221-227, 2017.

NAYLOR, A. et al. A predictive model for the cutting force in wood machining developed using mechanical properties. **Bioresources**, v.7, n.3, p.2883-2894, 2012.

ORLOWSKI, K. et al. Sawing frozen wood with narrow kerf saws: Energy and quality effects. **Forest products journal**, v. 59, n. 3, 2009.

PANSHIN, A. J.; DE ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**. 4.ed. New York, MacGraw-Hill, 1980.

PORANKIEWICZ, B.; TANAKA, C. Cutting forces by peripheral cutting of low-density wood species. **BioResources**, v.2, n.4, p.671-681, 2007.

PRANCE, G. T.; MORI, S. A. Pollination and dispersal of Neotropical Lecythidaceae. HCF Hopkins, CR Huxley, CM Pannell, GT Prance & F. White, The biological monograph: The importance of field studies and functional syndromes for taxonomy and evolution of tropical plants. **Royal Botanic Gardens**, Kew, 1998, p. 13-27.

RODRIGUES, A, C. S.; DINIZ, A, E.; COPPINI, N. L. **Análise das condições operacionais visando a obtenção das condições de usinagem otimizadas**. 70. Seminário de comando numérico no Brasil, São Paulo, SP, 1987.

ROSS, P. J. Taguchi techniques for quality engineering. Loss function, orthogonal experiments, parameter and tolerance design. **McGraw-Hill**, Inc., New York. p.63-99, 1988.

SALMON, S. C. **Fundamentals of grinding. Modern grinding process technology**. New York: McGraw-Hill, 1992. 225 p.

SILVA, E. M. **Fresamento com comando numérico computadorizado em madeiras de *Corymbia* e de *Eucalyptus*: Análise do consumo de energia**. Dissertação (Mestrado acadêmico) – Universidade Federal de Lavras – Lavras, 2016.

SILVA, J. C.; CASTRO, V. R.; EVANGELISTA, W. V. Influência da idade na usinabilidade da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden, visando uso na indústria moveleira. **Scientia Forestalis**, v.43, p.117-125, 2015.

SILVA, J. R. M. Relações da usinabilidade e aderência do verniz com as propriedades fundamentais do *Eucalyptus grandis* Hill Ex. Maiden. Tese (Doutorado acadêmico) – Universidade Federal do Paraná – Curitiba. 2002.

SYMON, K. R. **Mechanics**, Addison-Wesley, 1971.

SOFUOGLU, S. D. Determination of optimal machining parameters of massive wooden edge glued panels which is made of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) using Taguchi design method. **European Journal of Wood and Wood Products**, v.75, n.1, p.33-42, 2017.

SOUZA, E. M. et al. Specific cutting energy consumption in a circular saw for eucalyptus stands VM01 and MN463. **Cerne**, v.17, n.1, p. 109-115. 2011.

SU, W. C.; WANG, Y. Effect of the helix angle of router bits on chip formation and energy consumption during milling of solid wood. **Journal of wood science**, v.48 n.2, p.126-131, 2002.

TAGUCHI, G. **Off-line and On-line Quality Control Systems**. Proc. Int. Conf. On Quality Control. Tokyo, Japan, 1978.

TSOUMIS, G. Science and technology of wood: structure, properties, utilization. New York: **Van Nostrand Reinhold**, v. 115, 1991.

VAN HOUTS, J.; BHATTACHARYYA, D.; JAYARAMAN, K. Reduction of residual stresses in medium density fibreboard. Part 1. Taguchi Analysis. **Holzforschung**, v. 55, n. 1, p. 67-72, 2001.

WESTKÄMPER, E.; SCHADOFFSKY, O. Oberflächentopographie von Massivholz. Einflüsse und Verfahren bei der Meßtechnischen Erfassung und Bewertung von Holzoberflächen. Teil 2. HOB **Holzbearbeitung**, v.4, p.50-54, 1995.

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

YOSHIHARA, H.; OHTA, M. Estimation of the shear strength of wood by uniaxial-tension tests of off-axis specimens. **Journal of wood science**, 46(2), 159-163, 2000.

APÊNDICE I

Tabela 1 – Organização do experimento de aplainamento de tábuas de *B. excelsa* e de *P. elliottii* com velocidade de corte (V_c), velocidade de avanço (V_f) e profundidade de corte (P_c) controlados.

Variáveis controle				Variáveis resposta			
V_c^*	V_f	P_c	Espécie	Torque	Potência Mecânica**	Energia	Energia específica
($m.s^{-1}$)	($m.min^{-1}$)	(mm)		(Nm)	(kW)	(kJ)	($J.cm^{-3}$)
10	10	1	<i>B. excelsa</i>	5,99	1,20	3,61	0,48
16	10	1	<i>B. excelsa</i>	3,54	1,14	3,42	0,46
10	22	1	<i>B. excelsa</i>	5,33	1,07	1,46	0,19
16	22	1	<i>B. excelsa</i>	2,92	0,93	1,27	0,17
10	10	2	<i>B. excelsa</i>	7,18	1,47	4,41	0,29
16	10	2	<i>B. excelsa</i>	5,10	1,66	4,98	0,33
10	22	2	<i>B. excelsa</i>	7,75	1,58	2,16	0,14
16	22	2	<i>B. excelsa</i>	7,87	2,63	3,59	0,24
10	10	1	<i>P. elliottii</i>	5,72	1,15	3,44	0,46
16	10	1	<i>P. elliottii</i>	2,79	0,89	2,68	0,36
10	22	1	<i>P. elliottii</i>	6,18	1,25	1,70	0,23
16	22	1	<i>P. elliottii</i>	5,56	1,81	2,47	0,33
10	10	2	<i>P. elliottii</i>	6,07	1,23	3,68	0,25
16	10	2	<i>P. elliottii</i>	4,44	1,44	4,31	0,29
10	22	2	<i>P. elliottii</i>	9,08	1,89	2,58	0,17
16	22	2	<i>P. elliottii</i>	5,85	1,91	2,60	0,17
10	10	1	<i>B. excelsa</i>	4,88	0,97	2,91	0,39
16	10	1	<i>B. excelsa</i>	2,88	0,92	2,77	0,37
10	22	1	<i>B. excelsa</i>	7,03	1,44	1,96	0,26
16	22	1	<i>B. excelsa</i>	4,38	1,42	1,94	0,26
10	10	2	<i>B. excelsa</i>	6,08	1,23	3,69	0,25
16	10	2	<i>B. excelsa</i>	5,75	1,88	5,63	0,38
10	22	2	<i>B. excelsa</i>	9,08	1,87	2,55	0,17
16	22	2	<i>B. excelsa</i>	5,80	1,90	2,59	0,17
10	10	1	<i>P. elliottii</i>	4,43	0,88	2,63	0,35
16	10	1	<i>P. elliottii</i>	3,23	1,04	3,11	0,41
10	22	1	<i>P. elliottii</i>	5,52	1,10	1,51	0,20
16	22	1	<i>P. elliottii</i>	2,94	0,94	1,29	0,17
10	10	2	<i>P. elliottii</i>	4,28	0,85	2,54	0,17
16	10	2	<i>P. elliottii</i>	4,38	1,42	4,25	0,28
10	22	2	<i>P. elliottii</i>	7,09	1,46	1,99	0,13
16	22	2	<i>P. elliottii</i>	6,46	2,12	2,89	0,19
10	10	1	<i>B. excelsa</i>	4,42	0,88	2,63	0,35

16	10	1	<i>B. excelsa</i>	2,26	0,72	2,17	0,29
10	22	1	<i>B. excelsa</i>	5,83	1,18	1,61	0,21
16	22	1	<i>B. excelsa</i>	4,61	1,49	2,03	0,27
10	10	2	<i>B. excelsa</i>	7,77	1,59	4,78	0,32
16	10	2	<i>B. excelsa</i>	4,27	1,38	4,15	0,28
10	22	2	<i>B. excelsa</i>	8,67	1,81	2,46	0,16
16	22	2	<i>B. excelsa</i>	7,18	2,37	3,23	0,22
10	10	1	<i>P. elliottii</i>	4,33	0,86	2,57	0,34
16	10	1	<i>P. elliottii</i>	2,77	0,89	2,66	0,35
10	22	1	<i>P. elliottii</i>	5,57	1,12	1,52	0,20
16	22	1	<i>P. elliottii</i>	4,31	1,40	1,91	0,25
10	10	2	<i>P. elliottii</i>	5,30	1,06	3,18	0,21
16	10	2	<i>P. elliottii</i>	4,08	1,32	3,95	0,26
10	22	2	<i>P. elliottii</i>	9,08	1,88	2,56	0,17
16	22	2	<i>P. elliottii</i>	6,47	2,13	2,91	0,19

*o motor (3340 rpm) da velocidade de avanço é controlado pelo inversor de frequência

** A potência nominal do motor da plaina é de 0,59 kW

Fonte: Da autora (2020).

APÊNDICE II

Tabela 1 – Análise de variância para modelo quadrático completo para aplainamento testando a significância ($\alpha = 0,05$) dos parâmetros em relação ao torque (Nm).

Fonte	GL	SQ	QM	Valor-F	Valor-P
Modelo	10	125,418	12,542	20,600	0,000*
Linear	4	118,960	29,740	48,840	0,000*
Vc	1	38,209	38,209	62,740	0,000*
Vf	1	31,054	31,054	51,000	0,000*
Pc	1	47,330	47,330	77,720	0,000*
Espécie	1	2,367	2,367	3,890	0,056*
Interações de 2º ordem	6	6,458	1,076	1,770	0,133
Vc*espécie	1	0,345	0,345	0,570	0,456
Vc*Vf	1	0,016	0,016	0,030	0,871
Vc*Pc	1	0,222	0,222	0,360	0,549
Espécie*Vf	1	0,744	0,744	1,220	0,276
Espécie*Pc	1	1,766	1,766	2,900	0,097
Vf*Pc	1	3,365	3,365	5,530	0,024*
Erro	37	22,532	0,609		
Falta de ajuste	5	1,879	0,376	0,580	0,713
Erro puro	32	20,652	0,645	*	*
Total	47	147,950			

Vc = velocidade de corte; Vf = velocidade de avanço; pc = profundidade de corte; GL = grau de liberdade; SQ = soma de quadrados; QM = quadrado médio; Valor-F = valor de F calculado; Valor-p= Valor da probabilidade acima do valor do qui-quadrado calculado.

Fonte: Da autora (2020).

Tabela 2 – Análise de variância para modelo quadrático completo para aplainamento testando a significância ($\alpha = 0,05$) dos parâmetros em relação a potência mecânica (kW).

Fonte	GL	SQ	QM	Valor-F	Valor-P
Modelo	10	7,531	0,753	16,390	0,000*
Linear	4	6,725	1,681	36,580	0,000*
Vc	1	0,472	0,472	10,270	0,003*
Vf	1	2,370	2,370	51,550	0,000*
Pc	1	3,727	3,727	81,080	0,000*
Espécie	1	0,156	0,156	3,400	0,073
Interações de 2° ordem	6	0,807	0,134	2,930	0,019
Vc*Espécie	1	0,004	0,004	0,080	0,778
Vc*Vf	1	0,090	0,090	1,970	0,169
Vc*Pc	1	0,288	0,288	6,270	0,017*
Espécie*Vf	1	0,039	0,039	0,840	0,366
Espécie*Pc	1	0,144	0,144	3,130	0,085
Vf*Pc	1	0,242	0,242	5,270	0,028*
Erro	37	1,701	0,046		
Falta de ajuste	5	0,098	0,020	0,390	0,851
Erro puro	32	1,603	0,050	*	*
Total	47	9,232			

Vc = velocidade de corte; Vf = velocidade de avanço; pc = profundidade de corte; GL = grau de liberdade; SQ = soma de quadrados; QM = quadrado médio; Valor-F = valor de F calculado; Valor-p= Valor da probabilidade acima do valor do qui-quadrado calculado.

Fonte: Da autora (2020).

Tabela 3 – Análise de variância para modelo quadrático completo para aplainamento testando a significância ($\alpha = 0,05$) dos parâmetros em relação a energia (kJ).

Fonte	GL	SQ	QM	Valor-F	Valor-P
Modelo	10	40,799	4,080	20,740	0,000*
Linear	4	37,596	9,399	47,780	0,000*
Vc	1	1,570	1,570	7,980	0,008*
Vf	1	20,467	20,467	104,040	0,000*
Pc	1	14,512	14,512	73,770	0,000*
Espécie	1	1,047	1,047	5,320	0,027*
Interações de 2º ordem	6	3,203	0,534	2,710	0,028
Vc*Espécie	1	0,052	0,052	0,260	0,612
Vc*Vf	1	0,009	0,009	0,040	0,834
Vc*Pc	1	1,446	1,446	7,350	0,010*
Espécie*Vf	1	0,565	0,565	2,870	0,099
Espécie*Pc	1	0,875	0,875	4,450	0,042*
Vf*Pc	1	0,256	0,256	1,300	0,261
Erro	37	7,279	0,197		
Falta de ajuste	5	0,858	0,172	0,850	0,522
Erro puro	32	6,421	0,201	*	*
Total	47	48,078			

Vc = velocidade de corte; Vf = velocidade de avanço; pc = profundidade de corte; GL = grau de liberdade; SQ = soma de quadrados; QM = quadrado médio; Valor-F = valor de F calculado; Valor-p= Valor da probabilidade acima do valor do qui-quadrado calculado.

Fonte: Da autora (2020).

Tabela 4 – Análise de variância para modelo quadrático completo para aplainamento testando a significância ($\alpha = 0,05$) dos parâmetros em relação a energia específica de corte ($J.cm^{-3}$).

Fonte	GL	SQ	QM	Valor-F	Valor-P
Modelo	10	0,303	0,030	14,870	0,000*
Linear	4	0,280	0,070	34,210	0,000*
Vc	1	0,007	0,007	3,560	0,067
Vf	1	0,190	0,190	92,990	0,000*
Pc	1	0,077	0,077	37,820	0,000*
Espécie	1	0,005	0,005	2,480	0,124
Interações de 2º ordem	6	0,024	0,004	1,980	0,093
Vc*Espécie	1	0,001	0,001	0,380	0,541
Vc*Vf	1	0,001	0,001	0,350	0,557
Vc*Pc	1	0,006	0,006	3,020	0,091
Espécie*Vf	1	0,003	0,003	1,490	0,230
Espécie*Pc	1	0,004	0,004	1,730	0,196
Vf*Pc	1	0,010	0,010	4,920	0,033*
Erro	37	0,075	0,002		
Falta de ajuste	5	0,006	0,001	0,520	0,756
Erro puro	32	0,070	0,002	*	*
Total	47	0,379			

Vc = velocidade de corte; Vf = velocidade de avanço; pc = profundidade de corte; GL = grau de liberdade; SQ = soma de quadrados; QM = quadrado médio; Valor-F = valor de F calculado; Valor-p= Valor da probabilidade acima do valor do qui-quadrado calculado.

Fonte: Da autora (2020).