



**ESCOLA DE ENGENHARIA
FACULDADE DE ARQUITETURA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESIGN**

Cristine Bassols Raseira

**DESIGN E TECNOLOGIA APLICADOS A RESÍDUOS DE MADEIRA:
ESPECIFICAÇÕES PARA O PROCESSO DE CORTE A LASER EM MARCHETARIA**

Porto Alegre

2013



**ESCOLA DE ENGENHARIA
FACULDADE DE ARQUITETURA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESIGN**

Cristine Bassols Raseira

**DESIGN E TECNOLOGIA APLICADOS A RESÍDUOS DE MADEIRA:
ESPECIFICAÇÕES PARA O PROCESSO DE CORTE A LASER EM MARCHETARIA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Design da Universidade Federal do Rio Grande do Sul para obtenção do grau de Mestre em Design.

Orientador: Prof. Dr. Wilson Kindlein Júnior

Coorientadora: Profª. Dra. Lauren da Cunha Duarte

Porto Alegre

2013

Raseira, Cristine Bassols

Design e Tecnologia aplicados a Resíduos de Madeira:
Especificações para o Processo de Corte a Laser em Marchetaria /
Cristine Bassols Raseira. -- 2013.

168 f.

Orientador: Wilson Kindlein Jr..

Coorientadora: Lauren da Cunha Duarte.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do
Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Design,
Porto Alegre, BR-RS, 2013.

1. Resíduos madeireiros. 2. Marchetaria. 3. Corte a laser. I.
Kindlein Jr., Wilson, orient. II. Duarte, Lauren da Cunha, coorient. III.
Título.

Cristine Bassols Raseira

**DESIGN E TECNOLOGIA APLICADOS A RESÍDUOS DE MADEIRA:
ESPECIFICAÇÕES PARA O PROCESSO DE CORTE A LASER EM MARCHETARIA**

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Design, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Design da UFRGS.

Porto Alegre, 18 de janeiro de 2013.

Prof. Dr. Fábio Gonçalves Teixeira
Coordenador do Programa de Pós-Graduação da UFRGS

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Carlos Gustavo Martins Hoelzel
Universidade Federal de Santa Maria

Prof. Dr. Wilson Kindlein Júnior
Orientador
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Fábio Pinto da Silva
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Profa. Dra. Lauren da Cunha Duarte
Coorientadora
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Luis Henrique Alves Cândido
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

AGRADECIMENTOS

À minha família, em especial aos meus pais, Ailton (*in memorian*) e Maria, e aos meus irmãos, Marcelo e Rafael, pelo amor incondicional, incentivo constante e todos os valores que carrego comigo;

Ao Guilherme, pelo companheirismo, incessante dedicação e por acreditar;

Aos meus orientadores, Wilson Kindlein Jr. e Lauren Duarte, pela oportunidade, apoio, amizade e empenho demonstrados, me conduzindo pelo caminho da pesquisa e deixando ensinamentos que vão além do âmbito profissional;

Aos professores do LdSM, Liane Roldo, Fábio Pinto da Silva, Luís Henrique Cândido, Tatiana Campos Rocha e Everton Amaral, pelo exemplo de profissionalismo e pelas oportunidades de pesquisa;

À toda equipe técnica do LdSM, em especial a Lara Elena e Sidnei Pedrotti, pelo carinho e ajuda na utilização dos equipamentos;

Aos colegas do LdSM, em especial a Elisa Beretta, Flávia da Silveira (Dupla!), Mari City, Mari Pohlmann, Pati Gabert, Rodolfo Dalla Costa, Silvia Dapper e Wagner Rossi, pelos risos, choros e desaforos compartilhados, pelo convívio dentro e fora da universidade, pelos dois anos de histórias pra contar e pela amizade que espero ser eterna;

À equipe do CTPedras, em especial ao professor Juliano Tonezer, Edmundo Ipar e Rafael Bisinella, pela disponibilidade de uso dos equipamentos do centro e por todo o auxílio;

À equipe da Maquetaria e Oficina de Modelos e Protótipos, em especial ao professor Cândido e ao S. Paulinho, por toda ajuda no processamento dos resíduos de madeira;

À empresa de fornecimento de esquadrias de madeira Sul Catarinense, em especial ao Rafael Burigo, pelo apoio, interesse e fornecimento do material de trabalho;

Ao PGDesign, em especial ao corpo docente e aos funcionários, pelos ensinamentos e dedicação em atender às nossas necessidades;

Ao CNPq, pelo auxílio e pela bolsa concedida;

A todos que, de alguma forma, contribuíram para tornar esta pesquisa possível;

O meu sincero e profundo agradecimento.

Obrigada!

RESUMO

Aliando design e tecnologia à técnica da marchetaria, esta pesquisa intenta a valorização dos resíduos madeireiros provenientes de indústrias de esquadrias. O trabalho teve como objetivo a caracterização e a determinação dos parâmetros do processo de corte a laser para diferentes espécies de madeira visando possibilitar a reutilização de resíduos de esquadrias em marchetaria. O estudo de viabilidade desta tecnologia de alta precisão de corte para a marchetaria está pautado na busca pela redução do tempo de execução e pelo aumento na taxa de produção das peças, considerando a qualidade dos desenhos e o padrão de acabamento da técnica. Por meio de um levantamento de campo em algumas indústrias de esquadrias localizadas na cidade de Porto Alegre-RS, foram selecionadas sete espécies de madeira para o estudo: angelim da mata (*Hymenolobium excelsum*); angelim pedra (*Hymenolobium petraeum*); cedro mara (*Cedrelinga catenaeformis*); garapeira (*Apuleia molaris*); itaúba (*Mezilaurus itauba*); louro amazonense (*Thyrsodium schomburkianum*); e tauari (*Couratari oblongifolia*). Estas espécies foram caracterizadas no que tange às suas propriedades físicas de teor de umidade, densidades aparente e básica, e estabilidade dimensional. Foram também realizadas análises de espectroscopia por energia dispersiva de raios-X (EDS) para a determinação da composição química qualitativa e semiquantitativa das espécies. Os ensaios de aplicação da tecnologia de corte a laser nas espécies de madeira foram realizados em amostras de espessuras variadas: lâminas de 1 a 5 mm. As análises dos parâmetros do processo de corte a laser mais adequados para cada espécie de madeira e espessura de lâmina foram feitas com o auxílio de imagens de micro-estereoscopia. Dentre os parâmetros definidos estão a potência do feixe de laser, a aceleração e as velocidades de movimentação dos bocais de corte, o fluxo de saída do jato de ar, e a distância focal. Para a verificação da aplicabilidade destes parâmetros em marchetaria foram executados cinco painéis, variando a espessura das lâminas e a complexidade dos desenhos reproduzidos. As composições dos painéis foram baseadas no trabalho do artista gráfico M. C. Escher. Os ensaios práticos e analíticos foram realizados com a utilização dos equipamentos localizados no Laboratório de Design e Seleção de Materiais, na Maquetaria e Oficina de Modelos e Protótipos, ambos da UFRGS, e no Centro Tecnológico de Pedras, Gemas e Joias do Rio Grande do Sul, mantido pela UPF, Prefeitura Municipal de Soledade, Sindipedras, e vinculado a UFRGS.

Palavras-chave: resíduos madeireiros, marchetaria, corte a laser.

ABSTRACT

*Combining design and technology to the technique of marquetry, this research attempts to valorize the wood waste from the doors and windows industry. The investigation aims to characterize and determine parameters of laser cutting technology for different wood species in order to enable the reuse of the timber waste in marquetry. The feasibility study of this high precision cutting technology for marquetry is based in the quest for reducing the execution time and increasing the production rate of the pieces, considering the designs quality and the finishing technique standard. Through a field survey in some of the doors and windows industry located in the city of Porto Alegre-RS, seven wood species were selected for the study: angelim da mata (*Hymenolobium excelsum*); angelim pedra (*Hymenolobium petraeum*); cedro mara (*Cedrelinga catenaeformis*); garapeira (*Apuleia molaris*); itaúba (*Mezilaurus itauba*); louro amazonense (*Thyrsodium schomburkianum*); e tauari (*Couratari oblongifolia*). These species were characterized regarding their physical properties of moisture content, apparent and basic densities, and dimensional stability. Analyses of energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) were also made for determining the qualitative and semi quantitative chemical composition of the species. The tests on the application of laser cutting technology in wood species were performed on samples of various thicknesses: sheets of 1 to 5 mm. The analyses of the laser cutting process best parameters suited for each wood species and sheet thickness were made with the aid of micro-stereoscopic images. Among the defined parameters are the power output of the laser beam, the acceleration and speeds of the nozzles cutting movement, the air jet outflow, and the focal length. In order to verify the applicability of these parameters in marquetry, five panels were made, varying the sheets thickness and the designs complexity. The panels compositions were based on the work of the graphic artist M. C. Escher. The analytical and practical tests were performed using the equipments located at the Laboratory of Design and Materials Selection, the Workshop of Models and Prototypes, both from UFRGS, and the Technological Center of Stones, Gems and Jewels of Rio Grande do Sul, maintained by UPF, City Hall of Soledade, Sindipedras, and attached to UFRGS.*

Key-words: *timber waste, marquetry, laser cutting.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma da cadeia produtiva dos produtos florestais madeireiros e não madeireiros, indicando (em vermelho) que há geração de resíduos em todas as etapas do processo.	26
Figura 2 – Técnica da parquetaria utilizando uma serra de folhar para os cortes – padrão xadrez.....	39
Figura 3 – Técnica da parquetaria utilizando uma serra de bancada para os cortes – padrão “Cubo Louis”.....	39
Figura 4 – Peças produzidas por André-Charles Boulle.....	40
Figura 5 – Técnica de Boulle ou <i>tarsia a incastro</i>	41
Figura 6 – Técnica elemento por elemento.	42
Figura 7 – Cavalete de marchetaria com indicação das partes constituintes.....	43
Figura 8 – Técnica do corte bisel.....	45
Figura 9 – Painéis marchetados com molduras em padrões geométricos.	45
Figura 10 – Técnica da marchetaria em bloco ou <i>tarsia a toppo</i>	46
Figura 11 – Processo de corte a laser em lâmina de acrílico (PMMA) de 3 mm de espessura.	48
Figura 12 – Esquema ilustrativo do equipamento de corte a laser.	49
Figura 13 – Desenho esquemático do tronco de uma árvore.....	52
Figura 14 – Estrutura celular da madeira.....	54
Figura 15 – Tecido de diferentes espécies de madeira.	55
Figura 16 – Corpos de prova dispostos na câmara de secagem.	60
Figura 17 – Corpos de prova colocados em água.....	62
Figura 18 – Peças de madeira com dimensões aproximadas de 60x35x32 mm.....	65
Figura 19 – Processo de transformação das peças de madeira em lâminas de 3 mm.....	66
Figura 20 – Equipamento Automatisa®, modelo Assia.	67
Figura 21 – Desenho esquemático das porções das amostras e diferentes velocidades para os ensaios de corte com traços retos para lâminas de 4 mm e 5 mm.	69
Figura 22 – Processo de corte a laser sendo testado nas lâminas de 5 mm.	70
Figura 23 - Desenho esquemático das porções das amostras e diferentes velocidades para os ensaios de corte com traços retos para lâminas de 3 mm e 2 mm.	71
Figura 24 – Ensaio com círculos e quadrados para as cinco espessuras de lâmina.....	73

Figura 25 – Ensaio com círculos e quadrados com dimensões variadas para as cinco espessuras de lâmina.....	74
Figura 26 – Gráfico representativo do número de empresas x espécies de madeira utilizadas.	75
Figura 27 – Vista geral de uma das fábricas avaliadas e a disposição dos resíduos.	76
Figura 28 – Gráfico do volume (m ³) mensal de resíduo gerado em cada uma das seis empresas estudadas.....	77
Figura 29 – Angelim da mata: Imagem de MEV da superfície da amostra e espectros de EDS das áreas analisadas.	82
Figura 30 – Angelim pedra: Imagem de MEV da superfície da amostra e espectros de EDS das áreas analisadas.	83
Figura 31 – Cedro mara: Imagem de MEV da superfície da amostra e espectros de EDS das áreas analisadas.....	83
Figura 32 – Garapeira: Imagem de MEV da superfície da amostra e espectros de EDS das áreas analisadas.....	83
Figura 33 – Itaúba: Imagem de MEV da superfície da amostra e espectros de EDS das áreas analisadas.....	84
Figura 34 – Louro amazonense: Imagem de MEV da superfície da amostra e espectros de EDS das áreas analisadas.....	84
Figura 35 – Tauari: Imagem de MEV da superfície da amostra e espectros de EDS das áreas analisadas.....	84
Figura 36 – Lâminas de 3 mm confeccionadas a partir de peças de madeira de aproximadamente 60x35x32 mm.	86
Figura 37 – Ilustração dos possíveis defeitos de queima de partes das lâminas e das marcas geradas pelo movimento da ferramenta de corte.	88
Figura 38 – Amostras de 5 mm após ensaio com traços retos variando o parâmetro velocidade.	89
Figura 39 – Angelim da mata: ensaio com traços retos em amostras de 4 mm e 5 mm.....	91
Figura 40 – Cedro mara: ensaio com traços retos em amostras de 4 mm e 5 mm.	92
Figura 41 – Garapeira: ensaio com traços retos em amostras de 4 mm e 5 mm.	93
Figura 42 – Itaúba: ensaio com traços retos em amostras de 4 mm e 5 mm.	94
Figura 43 – Louro amazonense: ensaio com traços retos em amostras de 4 mm e 5 mm.....	95
Figura 44 – Tauari: ensaio com traços retos em amostras de 4 mm e 5 mm.....	96

Figura 45 – Gráfico representativo das profundidades dos cortes resultantes da ação do laser nas velocidades maiores do que a eficaz – Angelim da mata – 4 e 5 mm.....	98
Figura 46 – Gráfico representativo das profundidades dos cortes resultantes da ação do laser nas velocidades maiores do que a eficaz – Cedro mara – 4 e 5 mm.	98
Figura 47 – Gráfico representativo das profundidades dos cortes resultantes da ação do laser nas velocidades maiores do que a eficaz – Garapeira – 4 e 5 mm.	98
Figura 48 – Gráfico representativo das profundidades dos cortes resultantes da ação do laser nas velocidades maiores do que a eficaz – Itaúba – 4 e 5 mm.	99
Figura 49 – Gráfico representativo das profundidades dos cortes resultantes da ação do laser nas velocidades maiores do que a eficaz – Louro amazonense – 4 e 5 mm.....	99
Figura 50 – Gráfico representativo das profundidades dos cortes resultantes da ação do laser nas velocidades maiores do que a eficaz – Tauari – 4 e 5 mm.....	99
Figura 51 – Angelim da mata: ensaio com traços retos em amostras de 2 mm e 3 mm.....	101
Figura 52 – Cedro mara: ensaio com traços retos em amostras de 2 mm e 3 mm.	102
Figura 53 – Garapeira: ensaio com traços retos em amostras de 2 mm e 3 mm.	103
Figura 54 – Itaúba: ensaio com traços retos em amostras de 2 mm e 3 mm.	104
Figura 55 – Louro amazonense: ensaio com traços retos em amostras de 2 mm e 3 mm.....	105
Figura 56 – Tauari: ensaio com traços retos em amostras de 2 mm e 3 mm.....	106
Figura 57 – Gráfico representativo das profundidades dos cortes resultantes da ação do laser nas velocidades maiores do que a eficaz – Angelim da mata – 2 e 3 mm.....	107
Figura 58 – Gráfico representativo das profundidades dos cortes resultantes da ação do laser nas velocidades maiores do que a eficaz – Cedro mara – 2 e 3 mm.	108
Figura 59 – Gráfico representativo das profundidades dos cortes resultantes da ação do laser nas velocidades maiores do que a eficaz – Garapeira – 2 e 3 mm.	108
Figura 60 – Gráfico representativo das profundidades dos cortes resultantes da ação do laser nas velocidades maiores do que a eficaz – Itaúba – 2 e 3 mm.	108
Figura 61 – Gráfico representativo das profundidades dos cortes resultantes da ação do laser nas velocidades maiores do que a eficaz – Louro amazonense – 2 e 3 mm.....	109
Figura 62 – Gráfico representativo das profundidades dos cortes resultantes da ação do laser nas velocidades maiores do que a eficaz – Tauari – 2 e 3 mm.....	109
Figura 63 – Angelim da mata: ensaio com círculos e quadrados.	111
Figura 64 – Cedro mara: ensaio com círculos e quadrados.	112
Figura 65 – Garapeira: ensaio com círculos e quadrados.....	113
Figura 66 – Itaúba: ensaio com círculos e quadrados.....	114

Figura 67 – Louro amazonense: ensaio com círculos e quadrados.	115
Figura 68 – Tauari: ensaio com círculos e quadrados.	116
Figura 69 – Angelim da mata: Ensaio com círculos e quadrados de dimensões variadas nas amostras de 2 a 5 mm de espessura.	119
Figura 70 – Cedro mara: Ensaio com círculos e quadrados de dimensões variadas nas amostras de 1 a 5 mm de espessura.	120
Figura 71 – Garapeira: Ensaio com círculos e quadrados de dimensões variadas nas amostras de 1 a 5 mm de espessura.	121
Figura 72 – Itaúba: Ensaio com círculos e quadrados de dimensões variadas nas amostras de 1 a 5 mm de espessura.	122
Figura 73 – Louro amazonense: Ensaio com círculos e quadrados de dimensões variadas nas amostras de 1 a 5 mm de espessura.	123
Figura 74 – Tauari: Ensaio com círculos e quadrados de dimensões variadas nas amostras de 1 a 5 mm de espessura.	124
Figura 75 – Angelim da mata: gráfico representando a medida adicional para as cinco espessuras de lâmina.	125
Figura 76 – Cedro mara: gráfico representando a medida adicional para as cinco espessuras de lâmina.	125
Figura 77 – Garapeira: gráfico representando a medida adicional para as cinco espessuras de lâmina.	126
Figura 78 – Itaúba: gráfico representando a medida adicional para as cinco espessuras de lâmina.	126
Figura 79 – Louro amazonense: gráfico representando a medida adicional para as cinco espessuras de lâmina.	126
Figura 80 – Tauari: gráfico representando a medida adicional para as cinco espessuras de lâmina.	127
Figura 81 – Zonas afetadas pelo calor com alteração na coloração da madeira.	128
Figura 82 – Gráfico representativo das velocidades eficazes de corte, medidas em mm/s, das seis espécies de madeira nas cinco espessuras de lâminas e imagens dos detalhes do padrão de acabamento dos cortes efetuados.	129
Figura 83 – Gravuras com padrões geométricos desenvolvidos pelo artista M. C. Escher. ..	133
Figura 84 – Padrões geométricos inseridos em um círculo de 40 mm de diâmetro.	134
Figura 85 – Painel marchetado com o padrão cavalo marinho executado com lâminas de 1 mm.	136

Figura 86 – Painel marchetado com o padrão libélula executado com lâminas de 2 mm.....	137
Figura 87 – Painel marchetado com o padrão esquilo executado com lâminas de 3 mm.	138
Figura 88 – Painel marchetado com o padrão lagarto executado com lâminas de 4 mm.....	139
Figura 89 – Painel marchetado com o padrão borboleta executado com lâminas de 5 mm...	140

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Velocidades de corte, medidas em mm/s, utilizadas para cada espécie e espessura.	72
Tabela 2 – Média das medições das massas dos corpos-de-prova de cada espécie em câmara de secagem.....	78
Tabela 3 – Teor de umidade U(%) de cada espécie.	78
Tabela 4 – Média das dimensões e volume dos corpos de prova de cada espécie com umidade a 12%.	79
Tabela 5 – Densidade aparente ρ_{ap} de cada espécie.	79
Tabela 6 – Média das medições das massas dos corpos-de-prova de cada espécie submersos em água.....	80
Tabela 7 – Média das dimensões e volume dos corpos de prova de cada espécie saturados. ...	80
Tabela 8 – Densidade básica ρ_{bas} de cada espécie.	81
Tabela 9 – Média das dimensões e volume dos corpos de prova de cada espécie secos.	81
Tabela 10 – Estabilidade dimensional de cada espécie.	82
Tabela 11 – Média da variação dimensional das espessuras das lâminas de cada espécie após o corte.	87
Tabela 12 – Quantificação de lâminas produzidas.	88
Tabela 13 – Velocidades eficazes de corte para as espessuras 4 e 5 mm.	97
Tabela 14 – Velocidades eficazes de corte para as espessuras 2 e 3 mm.	107
Tabela 15 – Medida adicional para as seis espécies de madeira e cinco espessuras de lâmina.	117

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRAF	Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas
CAD	Desenho Auxiliado por Computador, do inglês <i>Computer Aided Design</i>
CFI	Complexo Florestal Industrial
CTPedras	Centro Tecnológico de Pedras, Gemas e Jóias do Rio Grande do Sul
DXF	Formato de Desenho de Intercâmbio, do inglês <i>Drawing Exchange Format</i>
EDS	Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios-X, do inglês <i>Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy</i>
EGP	Painéis Colados Lateralmente, do inglês <i>Edge Glued Panel</i>
FT-IR	Espectroscopia de Infravermelho por transformada de Fourier
ICSID	Conselho Internacional das Organizações de Design Industrial do inglês <i>International Council of Societies of Industrial Design</i>
LdSM	Laboratório de Design e Seleção de Materiais
MDF	Painel de Fibras de Madeira de Média Densidade do inglês <i>Medium Density Fiberboard</i>
MDP	Painel de Partículas de Madeira de Média Densidade, do inglês, <i>Medium Density Particleboard</i>
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	Norma Brasileira
OSB	Painel de Tiras de Madeira Orientadas, do inglês <i>Oriented Strand Board</i>
PMVA	Produtos de Maior Valor Agregado
POM	Pequenos Objetos de Madeira

SINDIPEDRAS Sindicato das Indústrias de Joalheria, Mineração, Lapidação, Transformação e Beneficiamento de Pedras Preciosas do Estado do Rio Grande do Sul

UFRGS Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UPF Universidade de Passo Fundo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 Contextualização e delimitação do tema	19
1.2 Formulação do problema de pesquisa	22
1.3 Formulação da hipótese de pesquisa.....	22
1.4 Objetivos.....	22
1.4.1 Objetivo Geral	22
1.4.2 Objetivos Específicos	22
1.5 Justificativa	23
2 REFERENCIAL TEÓRICO	24
2.1 Cadeia produtiva florestal e geração de resíduos madeireiros.....	24
2.1.1 Gerenciamento dos resíduos madeireiros	29
2.1.2 Potencialidades de uso dos resíduos madeireiros	30
2.2 Design como ferramenta para agregar valor ao resíduo madeireiro	33
2.3 Marchetaria e seus processos atuais de corte.....	37
2.3.1 Parquetaria	38
2.3.2 <i>Tarsia a incastro</i> ou técnica de Boulle	40
2.3.3 Técnica elemento por elemento	42
2.3.4 Técnica do corte bisel	44
2.3.5 Marchetaria em bloco ou <i>tarsia a toppo</i>	45
2.4 Processo de corte a laser para a marchetaria	47
2.5 Anatomia, propriedades e técnicas de caracterização da madeira	50
3 MATERIAIS E MÉTODOS	58
3.1 Trabalho de campo.....	58
3.2 Caracterização das madeiras.....	58
3.2.1 Ensaios para a determinação do teor de umidade.....	59
3.2.2 Ensaios para a determinação das densidades aparente e básica	60
3.2.3 Ensaios para a determinação da estabilidade dimensional	62
3.2.4 Análises de espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (EDS)	64
3.3 Obtenção de lâminas a partir dos resíduos madeireiros.....	64

3.4 Ensaio para a determinação dos parâmetros de corte a laser	67
3.4.1 Ensaio 01 – Traços retos.....	68
3.4.2 Ensaio 02 – Círculos e Quadrados.....	72
3.4.3 Ensaio 03 - Círculos e Quadrados de dimensões variadas	73
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	75
4.1 Dados coletados em trabalho de campo.....	75
4.2 Caracterização das madeiras.....	77
4.2.1 Teor de umidade	77
4.2.2 Densidades aparente e básica	78
4.2.3 Estabilidade dimensional.....	81
4.2.4 Microestrutura e química da madeira	82
4.3 Lâminas de madeira	85
4.4 Corte a laser	89
4.4.1 Ensaio 01 – Traços retos.....	89
4.4.2 Ensaio 02 – Círculos e Quadrados.....	110
4.4.3 Ensaio 03 - Círculos e Quadrados de dimensões variadas	118
4.5 Relação entre as propriedades da madeira e os parâmetros do corte a laser	128
5 APLICAÇÃO DO PROCESSO A LASER NA MARCHETARIA	132
6 CONCLUSÕES.....	141
6.1 Sugestões para trabalhos futuros	144
REFERÊNCIAS	146
APÊNDICE A – Tabela com médias, máximas, mínimas e desvios padrão das profundidades de corte resultante das velocidades testadas em que não houve rompimento total da lâmina, medidas na extremidade e meio das amostras da espécie Angelim da mata (<i>Hymenolobium excelsum</i>)	151

APÊNDICE B – Tabela com médias, máximas, mínimas e desvios padrão das profundidades de corte resultante das velocidades testadas em que não houve

rompimento total da lâmina, medidas na extremidade e meio das amostras da espécie Cedro mara (*Cedrelinga catenaeformis*) 154

APÊNDICE C – Tabela com médias, máximas, mínimas e desvios padrão das profundidades de corte resultante das velocidades testadas em que não houve rompimento total da lâmina, medidas na extremidade e meio das amostras da espécie Garapeira (*Apuleia molaris*) 157

APÊNDICE D – Tabela com médias, máximas, mínimas e desvios padrão das profundidades de corte resultante das velocidades testadas em que não houve rompimento total da lâmina, medidas na extremidade e meio das amostras da espécie Itaúba (*Mezilaurus itauba*) 160

APÊNDICE E – Tabela com médias, máximas, mínimas e desvios padrão das profundidades de corte resultante das velocidades testadas em que não houve rompimento total da lâmina, medidas na extremidade e meio das amostras da espécie Louro amazonense (*Thyrsodium schomburkianum*) 163

APÊNDICE F – Tabela com médias, máximas, mínimas e desvios padrão das profundidades de corte resultante das velocidades testadas em que não houve rompimento total da lâmina, medidas na extremidade e meio das amostras da espécie Tauari (*Couratari oblongifolia*) 166

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização e delimitação do tema

A conscientização acerca das questões ambientais está cada vez mais arraigada à sistemática dos projetos de design. Esta cultura projetual e o Ecodesign buscam diminuir os impactos ambientais e atender às necessidades humanas, vendo o ecossistema tão importante quanto à exequibilidade técnica e econômica. Um dos focos do Ecodesign é o ciclo de vida, considerado em todas as fases do produto, sendo elas pré-produção, produção, distribuição, uso e descarte. Este ciclo de vida do produto se refere aos fluxos de troca (*inputs* e *outputs*) com o ambiente (MANZINI e VEZZOLI, 2008). Sendo assim, dentre as diretrizes projetuais está a busca da máxima redução de resíduos. Ao mesmo tempo, os rejeitos gerados devem ser reciclados ou reutilizados o mais intensamente possível, tornando os *outputs* em *inputs* (PEREIRA, 2003).

Por resíduo se entende a sobra resultante de diversas atividades da sociedade, como os processos industriais, domésticos, hospitalares, comerciais, agrícolas, de serviços e ainda de varrição pública (ABNT, 2004). Considerado como lixo, o resíduo não possui valor ou utilidade e acarreta problemas ao ambiente uma vez que em sua grande maioria é subutilizado ou descartado de forma indevida (LIMA e SILVA, 2005).

No caso específico da cadeia produtiva florestal, depois do processamento primário, somente 40 a 60% do volume total das toras de madeira é aproveitado, o restante é resíduo. Este resíduo pode ser classificado como: serragem (decorrente da usinagem com serras), cepilho (decorrente do processamento em plainas) e lenha (englobando aparas, refilos, cascas, roletes). Embora a maior perda da madeira ocorra durante este processamento inicial, as operações de corte e acabamento das indústrias que utilizam o produto final desta primeira etapa também geram resíduos. Ainda que considerados de baixo nível poluidor, a sua estocagem ocupa espaço, e se queimados sem o devido controle, a céu aberto, ou em queimadores sem fins energéticos, poderão liberar gases poluentes ao ambiente (LIMA e SILVA, 2005).

A reutilização dos resíduos como matéria-prima alternativa faz com que estes deixem de ser um problema e, passando a um subproduto, gerem lucro. Os resíduos podem ser reaproveitados pela própria indústria que os produziu, ou vendidos a outras e empregados em usos diversos. Porém, é importante ressaltar que sendo oriunda de resíduo, a matéria-prima pode conduzir a valores simbólicos pejorativos, referindo-se ao que é desprezível. Além disso,

sua produção é bastante variável, dificultando a proposta de uma nova cadeia produtiva para o reaproveitamento destes resíduos (PEREIRA e CARVALHO, 2010). Ainda assim, a indústria madeireira apresenta grande potencial de reutilização de rejeitos, especialmente na produção de peças de artesanato, podendo, esta produção, atingir dimensões industriais (REVISTA DA MADEIRA, 2003). Neste âmbito, a marchetaria desponta como uma técnica passível da reutilização dos resíduos graúdos de madeira, as aparas. Este tipo de resíduo apresenta dimensão transversal variável de acordo com os pranchões e comprimento entre 5 e 20 cm, podendo por vezes ser ainda maior.

A marchetaria é um procedimento técnico e artístico de ornamentação no qual é percebido o valor da madeira natural em seus contrastes de cores e texturas evidenciados nos mais diversos desenhos. A palavra marchetaria tem origem no termo francês *marqueter*, que significa embutir. O processo combina diferentes folhas de madeira (lâminas delgadas com espessura variante entre 0,1 e 5 mm) num mesmo plano, gerando uma superfície lisa e de igual espessura, passível de ser aplicada como revestimento de um móvel ou elemento de decoração (GIBERT, LÓPEZ e ORDOÑEZ, 2000).

Atualmente, poucos artesãos conhecem e se mantêm fiéis às tradições da técnica, um trabalho manual minucioso de movimentos lentos e precisos para atingir um corte fino e rigoroso da madeira. O maquinário utilizado são ferramentas de corte, de perfuração, de percussão e extração, de aperto, de raspar e golpear e de prensar (GIBERT, LÓPEZ e ORDOÑEZ, 2000). Este processo de ornamentação pode ser auxiliado por algumas tecnologias de alta precisão de corte que aprimoram o seu planejamento e execução, como a tecnologia de corte a laser (IIDA *et al.*, 2010).

O uso do laser como agente erosivo possibilita a concentração do feixe em superfícies pequenas, com tamanhos e geometrias precisas. Além disso, apresenta o benefício da ausência de desgaste de ferramentas e de danos materiais, passíveis do processamento mecânico. Por outro lado, o surgimento de zonas afetadas pelo calor e a dificuldade de trabalhar com peças de grande espessura podem inviabilizar o seu uso. Estes contratempos podem ser ajustados pelas variáveis: potência, tempo, comprimento de onda, tamanho do ponto focal e disposição espacial (HAN, GUBENCU e PILLON, 2005).

O estudo e a aplicação do processo de corte a laser nos rejeitos de madeira para a técnica da marchetaria podem assegurar as condições necessárias para aumentar a taxa de produção e o controle de qualidade das peças trabalhadas. Além de possibilitar a minimização dos custos de produção e da geração de resíduos (HAN, GUBENCU e PILLON, 2005).

Em se tratando de um processo de remoção material, os objetivos são a precisão do tamanho e da forma, assim como o acabamento superficial. Mais especificamente, no corte de peças para a marchetaria, os resultados a serem observados são a rugosidade da superfície, a diferença de corte entre o topo e a base, e o contorno das arestas nos cantos. Ainda no caso desta pesquisa, no qual o processo estudado é o corte a laser, foi verificada a existência de zonas afetadas pelo calor, passíveis de danificar a coloração da madeira. Principalmente na porção superior da peça cortada, parte que permanecerá exposta depois do produto marchetado finalizado.

A complexidade do uso do laser como uma ferramenta para um corte preciso, contínuo e de qualidade é aumentada pela falta de homogeneidade da madeira, matéria-prima natural com variações de propriedades e comportamentos. Assim, para a investigação da viabilidade do emprego do corte a laser na madeira, é necessária também a caracterização e o estudo do material. A análise anatômica e dos principais tecidos da madeira traz informações sobre o seu comportamento durante o processamento, uma vez que a partir de tal análise é identificado o grau de resistência mecânica e o grau de resistência a deformações do material, dentre várias outras propriedades (GONZAGA, 2006). Percebe-se, portanto, que para a otimização da técnica da marchetaria através da inserção deste novo processo tecnológico de alta precisão de corte, um estudo sistemático é fundamental.

Para a concretização desta dissertação, as técnicas prático-analíticas foram realizadas no Laboratório de Design e Seleção de Materiais – LdSM, na Maquetaria e Oficina de Modelos e Protótipos, ambos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, e no Centro Tecnológico de Pedras, Gemas e Joias do Rio Grande do Sul – CTPedras, localizado no município de Soledade/RS, sede mantida pela Universidade de Passo Fundo – UPF, Prefeitura Municipal de Soledade, Sindicato das Indústrias de Joalheria, Mineração, Lapidação, Transformação e Beneficiamento de Pedras Preciosas do Estado do Rio Grande do Sul – SINDIPEDRAS, tendo como instituição conveniada a Universidade Federal do Rio Grande do Sul. As amostras de madeira foram proporcionadas pela Sul Catarinense, empresa de fornecimento de esquadrias de madeira, sediada no município de Porto Alegre.

1.2 Formulação do problema de pesquisa

É possível, por meio da incorporação da tecnologia de corte a laser, reutilizar os resíduos de madeira provenientes das indústrias de esquadrias em marchetaria reduzindo o tempo de execução e aumentando a taxa de produção das peças marchetadas, considerando a qualidade dos desenhos e o padrão de acabamento da técnica?

1.3 Formulação da hipótese de pesquisa

Caracterizando o material e estabelecendo os parâmetros adequados da tecnologia de corte a laser para os resíduos madeireiros da indústria de esquadrias é possível a sua reutilização em marchetaria, reduzindo o tempo de execução e aumentando a taxa de produção de peças marchetadas com desenhos de qualidade e elevado padrão de acabamento.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo Geral

Através do Design e da Tecnologia, auxiliar na reutilização de resíduos de madeira procedentes da indústria de esquadrias introduzindo o processo de corte a laser como inovação das técnicas de corte convencionais da marchetaria.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Levantar dados sobre as espécies de madeira utilizadas e os resíduos gerados na produção de esquadrias nas indústrias de Porto Alegre – RS;
- Caracterizar as diferentes espécies de madeira levantadas;
- Estudar e definir parâmetros de corte a laser para as diferentes espécies de madeira levantadas;
- Analisar a viabilidade de aplicação dos resultados obtidos em painéis para exemplificar os possíveis usos dos resíduos madeireiros na marchetaria.

1.5 Justificativa

Para responder à questão ambiental de excessiva exploração da madeira, pesquisas e estratégias têm sido desenvolvidas visando diminuir o desperdício do material durante os processamentos primário, secundário e terciário da cadeia produtiva florestal, como por exemplo, a otimização dos cortes para maior rendimento do recurso. Ainda assim, o material rejeitado pode ser empregado para outros fins (PEREIRA, CARVALHO e PINTO, 2010).

Dentre as diversas aplicações que atualmente são dadas aos resíduos de madeira estão: geração de energia, devido a sua capacidade calorífica; confecção de chapas de fibras ou partículas como o aglomerado, chapas duras e MDF; briquetes para produzir energia de forma mais eficaz através do maior controle do teor de umidade; polpa para a produção de papel; e carga para compostos poliméricos (LIMA e SILVA, 2005).

Porém, apesar de tais aplicações serem vantajosas, podem estar aquém das potencialidades de utilização dos resíduos. As madeiras devem ser preferencialmente utilizadas da forma mais nobre que lhes cabe, valorizando suas cores e texturas. Utilizando os resíduos graúdos de madeira, aqueles denominados aparas, em subprodutos, poderia ser agregado valor à matéria-prima descartada, enaltecendo as características estéticas e apreciativas do material (PEREIRA, CARVALHO e PINTO, 2010).

O design pode ser a ferramenta para transformar os simbolismos depreciativos inculcados nesta matéria-prima procedente de resíduos, transmitindo o conceito de nobreza já arraigado à madeira. Neste cenário, é destacada a técnica da marchetaria, cujos processos convencionais de produção se caracterizam pela utilização de ferramentas manuais.

O tempo de execução elevado e a necessidade de controle da qualidade dos desenhos e do acabamento dos produtos gerados por estes processos convencionais são algumas questões a serem estudadas na marchetaria. A adaptação desta técnica com a incorporação de novos processos tecnológicos de alta precisão de corte, como o uso do laser, poderia aperfeiçoar o seu projeto e execução, viabilizando peças marchetadas com desenhos de qualidade e elevado padrão de acabamento, executadas em menor tempo, aumentando, também, a taxa de produção das mesmas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Cadeia produtiva florestal e geração de resíduos madeireiros

As atividades da cadeia produtiva florestal podem ser divididas em dois grupos. No primeiro estão as atividades exclusivas do Complexo Florestal Industrial, em que são utilizadas basicamente matérias-primas do setor florestal, dentre elas celulose, papel, madeira serrada e painéis de madeira. E no segundo, as atividades pertencentes parcialmente ao Complexo Florestal Industrial, em que são utilizadas matérias-primas do setor florestal combinadas a outros insumos, como a indústria siderúrgica, da borracha, da construção civil e do mobiliário, entre outras (VIEIRA *et al.*, 2005).

O Complexo Florestal Industrial (CFI) é entendido como a somatória das operações que perpassam a geração e o fornecimento de produtos florestais. Dentre estas operações estão o extrativismo, as ações de produção nas unidades florestais, o armazenamento, o processamento e a distribuição destes produtos. Assim, do Complexo Florestal Industrial, fazem parte os fornecedores de bens e serviços florestais, os produtores florestais, os processadores da matéria-prima florestal, e os distribuidores dos produtos florestais (VIEIRA *et al.*, 2005).

Em relação aos produtos florestais, a ABRAF (2009) os classifica em não madeireiros e madeireiros. Os primeiros consistem em todo o material biológico de origem vegetal não-lenhoso e podem ser exemplificados com o látex, as resinas, as ceras, as gomas, as fibras tanantes, os corantes e os óleos aromáticos ou essenciais. Estes itens geralmente são obtidos através de extração não destrutiva, na qual as árvores são mantidas em produção, ou seja, não são cortadas. Já os segundos são oriundos da madeira e, do ponto de vista econômico, são os mais importantes da cadeia florestal.

Em se tratando dos artigos florestais madeireiros, o processamento da matéria-prima se divide em primário, secundário e terciário, cada um com um fluxo próprio ao seu respectivo segmento uma vez que os produtos abrangem uma vasta gama de finalidades. A primeira transformação concerne ao desdobro da tora, derivando em cavaco, madeira serrada, lâmina de madeira e carvão vegetal, além de energia. A partir destes, serão gerados outros produtos relativos a cada segmento industrial específico (ABRAF, 2009).

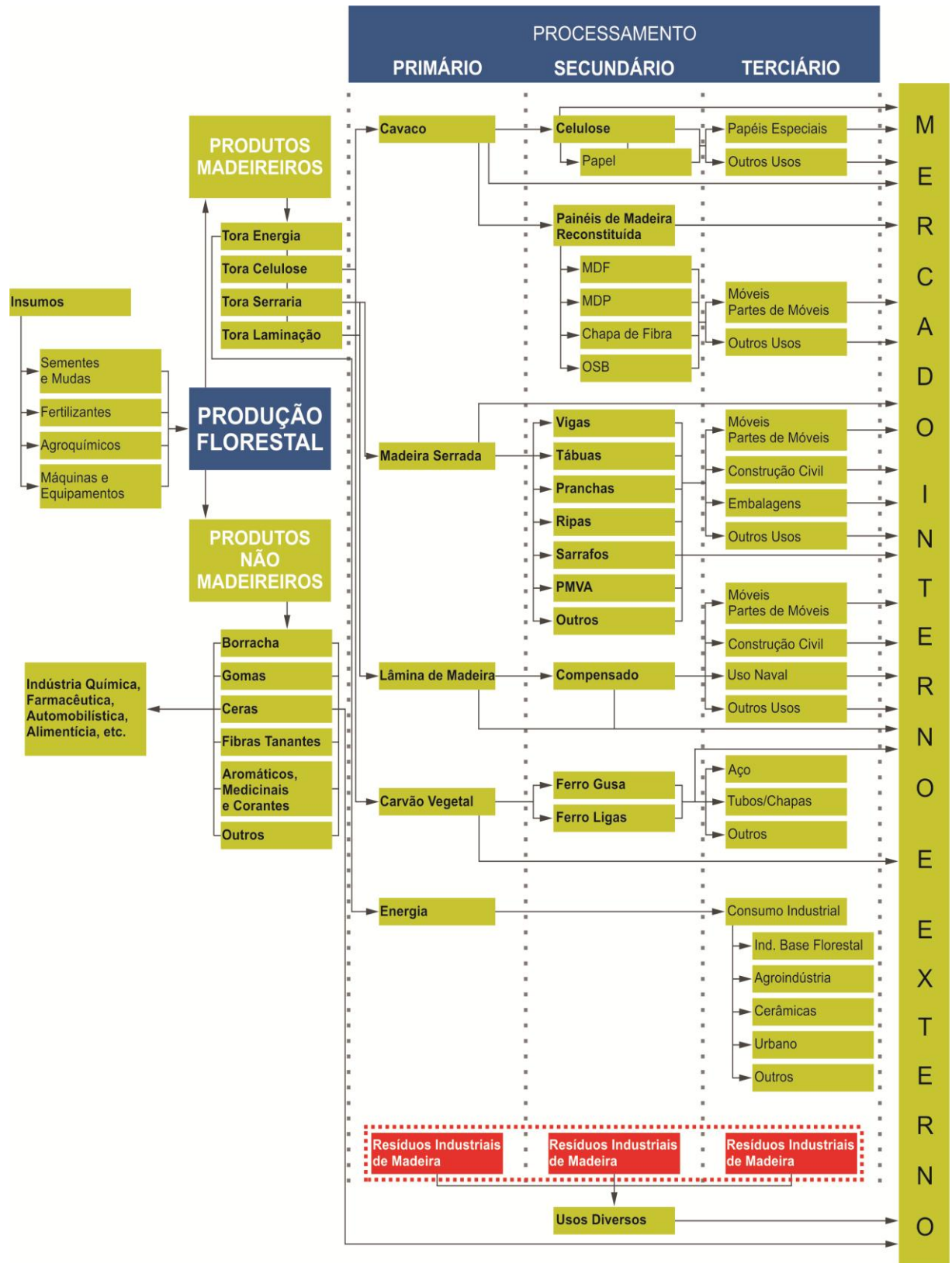
A etapa seguinte, o processamento secundário, trata-se do beneficiamento subsequente aos resultados obtidos no processamento primário, na qual podem originar-se produtos finais ou intermediários a outros processos. O cavaco (pequenos pedaços de madeira

oriundos da picagem ou destroçamento) é matéria-prima para a celulose e para as indústrias de painéis reconstituídos, gerando o MDF – Painel de Fibras de Madeira de Média Densidade, do inglês *Medium Density Fiberboard*, o MDP – Painel de Partículas de Madeira de Média Densidade, do inglês *Medium Density Particleboard* – e o OSB – Painel de Tiras de Madeira Orientadas, do inglês *Oriented Strand Board*, por exemplo. Da madeira serrada são elaboradas as vigas, as tábuas, as pranchas, as ripas, os sarrafos e os PMVA – produtos de maior valor agregado. Estes últimos englobam os chamados *clears*, *blocks* e *blanks* (madeira sólida aplainada nos quatro lados, livre de defeito), que darão origem às portas, escadas, pisos de madeira, componentes para móveis e o EGP – *Edge Glued Panel*, após processo de usinagem. A lâmina de madeira, seja ela torneada ou faqueada, gera o compensado decorativo ou estrutural. O carvão vegetal, por sua vez, é amplamente utilizado pela indústria siderúrgica na produção de ferro gusa e ferro liga (ABRAF, 2009).

A transformação terciária e última, no caso do processamento secundário não ser a fase final, é aquela que agrega maior valor econômico ao produto madeireiro. Da celulose derivam os papéis para impressão, papéis cartão, papelões ondulados para embalagem, além de alguns tecidos. Os painéis de madeira reconstituída são muito utilizados na confecção de móveis. E os produtos provenientes da madeira serrada, já citados, e àqueles originários das lâminas de madeira são aplicados principalmente na indústria da construção civil e também de móveis (ABRAF, 2009). O fluxograma da cadeia produtiva da madeira descrito está representado na Figura 1.

A cadeia produtiva da madeira, considerando os produtos finais e seus usos, ainda pode ser segmentada em três grandes linhas: a cadeia da geração de energia, a do papel e celulose e a do processamento mecânico. Esta última utiliza-se da madeira bruta e de processos mecânicos para o seu desdobramento: a transformação das toras em componentes de madeira maciça nas serrarias, a laminação e a produção de painéis e compensados. Os processamentos da matéria-prima por meio de usinagem são classificados como descascamento, desdobro, laminação, produção de partículas e beneficiamento. Cada um deles define o trabalho de transformação formal pelo qual a madeira passa (HILLIG, SCHNEIDER e PAVONI, 2009). Todos os processos industriais mencionados, envolvendo a transformação e o beneficiamento de toras que originam diversos produtos e subprodutos florestais, acarretam uma grande geração de resíduos sólidos uma vez que parte do material não é incorporada ao produto final (ZOLDAN, LEITE e KOVALESKI, 2006).

Figura 1 – Fluxograma da cadeia produtiva dos produtos florestais madeireiros e não madeireiros, indicando (em vermelho) que há geração de resíduos em todas as etapas do processo.



Fonte: Adaptado de ABRAF, 2009.

Os resíduos sólidos são conceituados pela NBR 10.004 (ABNT, 2004) como material, substância, objeto ou bem descartado resultante das cadeias de produção e consumo humano que, por limitações tecnológicas ou de mercado, não apresentam valor de uso ou econômico. O conceito de rejeito abarca os resíduos sólidos que, depois de esgotadas as chances de tratamento e recuperação por meio das tecnologias disponíveis e considerando a viabilidade econômica, não oferecem outra possibilidade que não a sua disposição final. Quando manejados de maneira imprópria, os resíduos sólidos podem causar impactos negativos ao ambiente.

A classificação de resíduos abrange a identificação da atividade que os originou e de seus constituintes. Estes, ainda, são confrontados com listagens de substâncias de conhecido impacto à saúde e ao ambiente. Os resíduos, quanto à sua origem, podem ser classificados como industrial, doméstico, hospitalar, comercial, agrícola, de serviço e de varrição. Quanto ao seu estado físico, podem ser sólido, pastoso, líquido e gasoso. Quanto à periculosidade e composição química se dividem em classe I – perigosos e classe II – não perigosos. Esta segunda se subdivide em classe II A – não inertes e classe II B – inertes. Os resíduos perigosos apresentam risco à saúde pública e ao ambiente, exigindo tratamento e disposição especial. Os não perigosos e não inertes podem ser biodegradáveis, combustíveis ou solúveis em água. Enquanto os não perigosos e inertes são aqueles que submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, não apresentam nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, desconsiderando os aspectos de cor, turbidez, dureza e sabor (ABNT, 2004). O resíduo madeireiro é classificado como de origem industrial, sólido e não perigoso, porém não inerte (PEREIRA, CARVALHO e PINTO, 2010).

Todo o material resultante da colheita ou do processamento de matérias-primas florestais que, por limitações técnicas ou mercadológicas, permanece sem uso ao longo do processo sendo assim descartado é tido como resíduo florestal. Estes se dividem, entre outros, em resíduos da colheita florestal, resíduos da produção de celulose e papel, resíduos da produção de carvão vegetal e resíduos madeireiros (ULIANA, 2005).

Os resíduos da colheita florestal, originários das árvores, mantêm-se no campo após exploração e podem rebrotar. São compostos por cascas, galhos, folhas, brotos, raízes e árvores mortas ou abatidas acidentalmente. Uma vez que possuem 5% de matéria seca e 50% de nutrientes necessários às plantas, as folhas apresentam utilidade quando deixadas no solo, enquanto o restante dos resíduos caracteriza-se como desperdício (OLANDOSKI, 2001). Aqueles oriundos da produção de celulose e papel são cascas, rejeitos de cavaco, lama de cal,

cinza leve, cinza pesada, entre outros. E os resíduos da produção de carvão vegetal são os finos do carvão, o alcatrão e o licor de pirolenhoso (ULIANA, 2005).

Os resíduos advindos do processamento mecânico, por sua vez, podem ser descritos como a parcela da tora não convertida em madeira comercial, compreendendo costaneiras, aparas, pontas, maravalhas, serragem e peças desqualificadas pela presença de defeitos. Estes apresentam variabilidade nas características físicas, químicas e mecânicas, dependentes do tipo e origem da matéria, influenciando, assim, a sua destinação final (OLANDOSKI, 2001).

Em função de suas dimensões, os resíduos madeireiros podem ser classificados em três tipos: serragem, cepilho e lenha. A serragem é encontrada em todos os tipos de indústrias de transformação da madeira, à exceção das laminadoras, e é gerado principalmente por operações com serra. O cepilho, também conhecido como maravalha, é originado pelo processamento por meio de plainas e é geralmente encontrado em indústrias beneficiadoras, como a da construção civil e de móveis. Já a lenha engloba os resíduos maiores, as costaneiras, aparas e refilos. Sendo encontrada em todas as indústrias madeireiras, a lenha apresenta a tendência de gerar novos produtos de menores dimensões (DUTRA, NASCIMENTO e NUMAZAWA, 2005; LIMA e SILVA, 2005). Em relação às porcentagens de cada um dos tipos, lenha é o resíduo de maior representatividade, correspondendo a 71%, seguido pela serragem com 22% e pelo cepilho com 7% (BRITO, 2005).

Considerando a cadeia produtiva da madeira, as atividades desempenhadas pelas indústrias de transformação primária, principalmente serrarias e laminadoras, são responsáveis pela maior produção de resíduos, representando em torno de 80% do total (HILLIG, SCHNEIDER e PAVONI, 2009). Já nas indústrias de processamento secundário e terciário, como a indústria de móveis e da construção civil, a quantidade de resíduos produzida é bastante variável de acordo com o tipo de atividade e produto (BRAND *et al.*, 2004).

É percebido que a produção de resíduos advindos das indústrias de base florestal em toda a cadeia produtiva da madeira é grande, acarretando perdas significativas desta matéria-prima. Esta geração de resíduos não somente se apresenta como um problema econômico, através do desperdício, mas também como um problema de ordem ambiental, que necessita ser reavaliado por meio de um gerenciamento mais eficiente (NASCIMENTO, 2009).

2.1.1 Gerenciamento dos resíduos madeireiros

Apesar de considerados de baixo nível poluidor, os resíduos madeireiros são considerados uma adversidade por três razões essenciais: para a sua estocagem é necessário espaço; o desperdício de matéria-prima que poderia ser utilizada em outros produtos gera prejuízo financeiro; e a crescente necessidade de matéria-prima ocasiona pressão nas florestas existentes, impactando negativamente sobre o ambiente (OLANDOSKI, 2001).

Nos processos de beneficiamento da madeira, as tecnologias empregadas são, na maioria das vezes, rudimentares e a quantidade de matéria-prima consumida é maior do que o necessário, ocasionando maiores desperdícios (ZOLDAN, LEITE e KOVALESKI, 2006). Além disso, o descarte residual em locais impróprios também gera problemas ambientais. No caso do processamento primário, grande parte dos resíduos é abandonada na área da colheita para ser queimada a céu aberto ou descartada em cursos d'água. Já nos casos do processamento secundário e terciário, os resíduos são destinados à queima em sistema de co-geração de energia térmica, queimados a céu aberto, ou descartados em aterros, terrenos baldios ou cursos d'água (LOPES, 2009).

Há de se ressaltar que a queima a céu aberto ou em queimadores sem fins energéticos ocasiona a liberação de gases poluentes para o ambiente (LIMA e SILVA, 2005). Ainda, a madeira tratada, definida como aquela que recebeu tratamento ou mudança química (pintura, laminados plásticos, preservantes contra agentes xilófagos, resinas, colas ou adesivos, compensados, chapas de partículas e outros compostos de madeira – MDF, OSB, MDP) exige maior atenção na gestão de seus resíduos (OLANDOSKI, 2001). Estes não devem ser utilizados em forração de granjas ou adubo de hortaliças, nem ser incinerados, sem controle, para a produção de energia, devido à possível toxicidade das substâncias nele empregadas (PEREIRA, CARVALHO e PINTO, 2010).

Os problemas advindos do manejo inadequado dos resíduos madeireiros poderiam ser sanados a partir de medidas eficientes de gerenciamento (OLANDOSKI, 2001). Pesquisas vêm sendo desenvolvidas a fim de melhorar o aproveitamento da madeira, diminuindo o desperdício de matéria-prima tanto na operação da colheita quanto na otimização dos cortes para maior rendimento. Além disso, a parte rejeitada vem sendo estudada para ser utilizada em novos produtos de usos variados com maior valor agregado (PEREIRA, CARVALHO e PINTO, 2010). A valorização de um resíduo, sempre que econômica e tecnicamente viável, busca a contribuição para solucionar um problema ambiental e auxilia na redução de custos da produção e disposição final. Essa valorização faz do material residual de uma empresa a

matéria-prima de outra, ou dela própria. Dentre os benefícios da utilização dos resíduos madeireiros estão: maiores índices de produtividade, o surgimento de novas oportunidades de mercado e a diminuição de custos dos produtos, além da redução da exploração da madeira virgem (LOPES, 2009).

Porém, o aproveitamento dos resíduos madeireiros é bastante complexo. A dificuldade de reutilização dos mesmos está pautada na diversidade de espécies e consequente diferença de trabalhabilidade; nas formas e dimensões dos resíduos; na sazonalidade; nas limitações técnicas; no baixo valor agregado no estado natural; na dispersão espacial no caso da colheita; no custo do transporte entre o local gerador e de aproveitamento; e nas diferentes necessidades entre os setores produtivos da madeira (LOPES, 2009).

Assim, para uma melhor avaliação das possíveis alternativas de destinação dos resíduos madeireiros, é necessária uma caracterização dos mesmos. Esta pode ser feita em função de sua origem, do seu tipo, de seus fatores geradores, de sua quantidade, de sua composição/periculosidade, de suas características físicas, de sua sazonalidade, de sua dispersão espacial e formas de manejo. E, a partir desta caracterização, é possível embasar o processo de tomada de decisão em relação ao seu gerenciamento (ULIANA, 2005).

O gerenciamento dos resíduos madeireiros e a contribuição de alternativas tecnológicas que permitam a sua eliminação, redução ou reaproveitamento são necessidades urgentes para a saúde do ambiente e melhoria de qualidade de vida humana. O uso da matéria-prima florestal, quando controlado, possibilita um menor impacto sobre os meios físico, biótico e sócio-econômico que constituem o ambiente, diminuindo o desperdício de material, reduzindo a exploração da madeira virgem, gerando novas fontes de renda e incentivando a economia (REVISTA DA MADEIRA, 2003).

2.1.2 Potencialidades de uso dos resíduos madeireiros

Grande parte do resíduo madeireiro é tecnicamente empregável em subprodutos. Porém, as características do material residual da indústria da madeira limitam o seu processamento mecânico e esta matéria-prima acaba por ser subutilizada visto que os custos de reaproveitamento são altos. Além disso, os resíduos possuem baixo valor e aparentemente não apresentam perspectivas lucrativas às empresas. Superando estes e outros obstáculos, como as limitações de quantidade, uniformidade, sazonalidade, formas e dimensões, há diversas potencialidades de uso para estes resíduos. Dentre as possíveis aplicações dos resíduos de madeira estão a compostagem, a produção de energia e combustível, a confecção

de painéis à base de madeira, a produção de polpa e papel, o seu emprego como cargas para compostos poliméricos e vários outros fins (OLANDOSKI, 2001).

O processo de compostagem é utilizado como fertilizante orgânico. Uma vez que este processo pode ser preparado a partir de matéria vegetal e animal, o resíduo madeireiro é passível de ser empregado. Esta matéria é agrupada, irrigada e revolvida a fim de que o tempo de decomposição seja acelerado. A técnica é definida como um método controlado de decomposição microbiana de oxidação de uma massa heterogênea de matéria orgânica no estado sólido e úmido, passando pelas fases de fitotoxicidade, bioestabilização e maturação. É bastante empregado em suinocultura e avicultura (REVISTA DA MADEIRA, 2003).

Os resíduos de madeira são também muito utilizados para a geração de energia através da queima devido ao seu elevado poder calorífico, ou seja, capacidade de produzir energia. Resíduos secos apresentam o valor aproximado de 3.000 kcal/kg; resíduos com 35% de umidade, em torno de 1.620 kcal/kg; e a casca entre 4.400 e 5.400 kcal/kg. (OLANDOSKI, 2001).

Outra maneira de utilizar os resíduos de madeira para geração de energia é através da confecção de briquetes. A briquetagem é o processo de compactação dos resíduos, na qual é destruída a elasticidade natural das fibras, resultando em um produto de pequeno volume, alta densidade e elevado poder calorífico. O procedimento utiliza altas temperaturas e pressões produzidas por uma máquina rotativa de extrusão oferecendo um produto homogêneo, sem aglomerantes adicionais (a temperaturas de 150 – 200°C a lignina é liquefeita e ao resfriar se transforma em um aglomerante natural criando uma camada externa contra a umidade do ar). Com a compactação dos resíduos existe um maior controle sobre o teor de umidade, permitindo uma queima mais uniforme e maior eficiência para a geração de energia. É originado um material de tamanho constante, de mais fácil armazenamento, embalagem, transporte e manuseio do que os resíduos em sua forma primária (LIMA e SILVA, 2005; REVISTA DA MADEIRA, 2003).

Os resíduos também se qualificam como matéria-prima para a geração de combustíveis gasosos e líquidos, como o metanol e etanol, através de processos como gaseificação, liquefação e hidrólise. Na gaseificação, por meio de decomposição térmica, na qual o material é queimado em condições controladas, é obtido um gás combustível, com o fim de alimentar caldeiras e movimentar motores. Colocados sob condições especiais de temperatura e pressão, o monóxido de carbono e o hidrogênio, adquiridos na gaseificação, são liquefeitos, completando o processo de liquefação. Tanto a hidrólise ácida quanto a

enzimática, com a quebra das longas cadeias celulósicas, atuam na produção de etanol (REVISTA DA MADEIRA, 2003).

Ainda, utilizando-se os resíduos da cadeia produtiva florestal é possível a confecção de uma grande variedade de painéis à base de madeira, como o aglomerado, o MDF, o OSB, e o MDP. Para a fabricação destes painéis são utilizadas tiras, fibras e partículas de madeira, aglutinadas por meio de uma resina, normalmente a uréia-formaldeído ou o fenol-formaldeído, dependendo das propriedades de resistência necessárias. A matéria-prima florestal pode provir de resíduos industriais (serrarias e indústrias de móveis e da construção civil), resíduos da exploração florestal (toras e galhos), madeiras de qualidade inferior não industrializáveis de outras maneiras, e reutilização de madeiras descartadas em demolições (REVISTA DA MADEIRA, 2003).

O tipo de painel confeccionado e os equipamentos disponíveis para o processamento são determinantes nas formas e condições da matéria-prima, ou seja, dos resíduos. No caso dos painéis de fibras e tiras, a característica primordial é o tamanho dos fragmentos, que advém do desfibramento da madeira, como pequenos resíduos, maravalhas e serragens. Já nos painéis de partículas, o tamanho e forma dos mesmos influenciam as propriedades e qualidades da chapa, sendo utilizados no processo resíduos de cortes superficiais e serragem. Alguns fabricantes destes painéis aceitam a variação do resíduo fornecido uma vez que dispõem de equipamentos para a redução e controle do tamanho das fibras e partículas necessárias à sua confecção (OLANDOSKI, 2001).

Outra potencialidade de uso para os resíduos de madeira é a produção de polpa e papel. Uma vez que pode afetar o processo de polpação e o rendimento, a madeira deve estar livre de contaminantes como colas e adesivos, tintas, material polimérico e preservantes químicos. Há também de se considerar o tamanho da fibra do resíduo, que atua na resistência do papel produzido (OLANDOSKI, 2001).

Ainda podem ser citadas diversas outras aplicações para os resíduos madeireiros. É comum o uso da farinha de madeira como carga para compostos poliméricos, sendo viável a transformação dos resíduos neste aditivo (LIMA e SILVA, 2005). Dependendo da espécie arbórea, a casca pode apresentar usos medicinais ou ser utilizada para adicionar sabor a comidas e bebidas. Dela também se obtém extrativos como taninos, ceras, óleos essenciais, complexos fenólicos e material adesivo (OLANDOSKI, 2001).

Apesar das aplicações expostas serem interessantes, os resíduos podem estar sendo subutilizados, e suas potencialidades de uso menosprezadas. As madeiras devem ter as suas qualidades sensoriais, cores e texturas valorizadas na maneira como são utilizadas (PEREIRA,

2003). Neste sentido o design pode ser a ferramenta de transformação dos resíduos madeireiros em subprodutos que enalteçam as características estéticas e apreciativas da madeira.

2.2 Design como ferramenta para agregar valor ao resíduo madeireiro

Löbach (2001) define design como uma ideia, um projeto ou um plano para solucionar um dado problema. O conceito de design compreende, portanto, a corporificação do imaginário na forma de projetos ou modelos, mediante a construção e a configuração, derivando em um produto industrial passível de produção em série. A noção de design como configuração, no sentido de materialização de uma ideia, é ampla, na qual o objeto da configuração permanece em aberto. Esta noção torna-se mais específica quando relacionada a outro conceito, que tenha alguma preponderância sobre ela. O conceito de ambiente pode unir-se ao design, resultando no design ambiental, que se desdobra em vários tipos, incluindo o design industrial. O design industrial, por sua vez, é definido como um procedimento de adequação dos produtos fabricados industrialmente às necessidades físicas e psíquicas dos usuários.

Aliado à resolução dos problemas decorrentes das necessidades humanas, Papanek (2007) aborda o propósito do design de diminuição dos impactos ambientais, trazendo o conceito de ecodesign. Esta cultura projetual considera, em todas as suas fases, o conceito de ciclo de vida, referindo-se aos fluxos de troca de matéria e energia entre o ambiente e o conjunto de processos que compreendem o nascimento, vida e morte de um produto. Para tanto, as atividades de pré-produção, produção, distribuição, utilização e descarte são tidas como uma unidade. O design passa a adotar uma abordagem sistêmica, onde o projeto não é apenas do produto, mas do sistema-produto como um todo. O objetivo é o de reduzir a carga ambiental, analisando o conjunto de *inputs* e *outputs* de todas as fases, minimizando o consumo de materiais e energia, bem como o impacto das emissões e descartes poluentes ao meio (MANZINI e VEZZOLI, 2008).

Algumas estratégias que envolvem o ecodesign, e conseqüentemente o projeto do ciclo de vida, são: otimizar o uso de recursos naturais através da máxima eficiência energética, de água e outros materiais; selecionar materiais de baixo impacto ambiental, evitando os tóxicos e aqueles que provoquem danos substanciais na sua extração e processamento; minimizar os resíduos gerados, favorecendo a reutilização e a reciclagem; e prolongar a vida útil dos produtos, facilitando a sua atualização, adaptação, manutenção e

reparo. Dentro da estratégia de minimizar a geração de resíduos, está a extensão da vida dos materiais e o projeto para a valorização dos materiais descartados, que traz também como benefício a redução do consumo de recursos virgens (MANZINI e VEZZOLI, 2008). Inúmeros materiais e produtos descartados poderiam ser aproveitados para outro fim ou transformados em outros objetos (MUNARI, 2008).

A busca pela valorização do resíduo graúdo de madeira, tratado como matéria-prima alternativa para o desenvolvimento de novos produtos, levou ao surgimento dos chamados Pequenos Objetos de Madeira (POMs). Neles, o resíduo madeireiro mostra-se passível de ser empregado como um material nobre e usado em produtos com maior valor agregado (BARBOSA *et al.*, 2011).

A importância destes objetos recai na sua viabilidade econômica, uma vez que a matéria-prima é abundante e de baixo custo, sendo por vezes gratuita. Além disso, as possibilidades de criação de produtos são diversas e suas aplicações podem ser em variadas áreas. Dentre os exemplos de aplicação a ser observados estão os artigos domésticos, como tábuas de carne, bandejas, espátulas e colheres; artigos de decoração, como revestimentos, caixa de jóias, baús, luminárias, molduras e madeira marchetada; artigos para escritório, como porta-caneta e porta-cartão; brinquedos, como dominós, dados, carros e casas de bonecas; e artigos para jardinagem e paisagismo, como cachepôs, floreiras e deques (BARBOSA *et al.*, 2011; LOPES, 2009).

A execução destes produtos pode ser artesanal ou industrial. A exequibilidade da produção de POMs, tanto artesanal quanto industrial, depende de uma intervenção na qualidade dos objetos para a sua aceitação de mercado. Estas intervenções podem se dar a partir da implementação de programas de desenvolvimento de novos produtos e de melhorias no design das peças, avaliando as características estético-formais, técnico-construtivas e funcionais (LOPES, 2009).

Sendo oriunda de resíduos, a matéria-prima utilizada na confecção destes produtos pode conduzir a valores simbólicos pejorativos, como *sobra*, *lixo* ou *sujeira*, referindo-se ao que é desprezível (PEREIRA e CARVALHO, 2010). A qualidade de um produto geralmente depende da qualidade de seus insumos. O conceito de “*entra lixo, sai lixo*” se baseia na observação de que bons insumos comumente levam a bons produtos, e maus insumos usualmente geram maus produtos. Porém, esta condição pode ser resolvida a partir da intervenção do design (LIDWELL, HOLDEN e BUTLER, 2010).

Os produtos fabricados a partir dos resíduos madeireiros devem obter um acabamento uniforme e qualidade estética, explorando as cores e texturas naturais da madeira.

A incorporação do design ao projeto de POMs é determinante para a expansão desta categoria de produtos, e tão necessária quanto um moderno maquinário e um processo tecnológico ágil de produção. Os principais aspectos associados seriam a inovação, a racionalização, a evolução tecnológica, o padrão estético e a rápida percepção da função (LOPES, 2009).

As funções dos produtos, percebidas no processo de utilização e passíveis de satisfazer as necessidades dos usuários, são aspectos fundamentais das relações entre os usuários e os produtos industriais. As três funções essenciais dos produtos são classificadas em prática, estética e simbólica. Estas podem ser hierarquizadas pelo seu grau de importância, onde a função principal está sempre atrelada às secundárias. No processo de uso, as necessidades dos usuários são satisfeitas concedendo ao produto certas funções, enquanto no processo de desenvolvimento dos produtos, o projetista e o designer industrial devem otimizá-las (LÖBACH, 2001).

As funções práticas dos produtos são os aspectos fisiológicos do uso, traduzidos nas relações que se situam no plano orgânico-corporal entre usuário e produto. As funções estéticas são os aspectos psicológicos da percepção sensorial do uso. Elas estão atreladas à aparência material do produto, percebida através dos sentidos. Uma vez que a aparência pode atuar de maneira positiva ou negativa sobre o usuário, repercutindo em um sentimento de aceitação ou rejeição do produto, a função estética adquire grande importância nas empresas de um mercado cada vez mais competitivo. O designer, além de promover melhorias no uso sensorial dos produtos, adquire o papel de propulsor de vendas, capaz de suscitar o interesse dos usuários promovendo o bem-estar dos mesmos. Já a função simbólica deriva dos aspectos estéticos do produto e se configura nos aspectos espirituais, psíquicos e sociais do seu uso. Sua manifestação ocorre por meio dos elementos estéticos, como forma, cor e tratamento de superfície, que se associam a imagens de outros âmbitos da vida. Assim, a função simbólica alcança êxito quando baseada na aparência apreendida sensorialmente e na capacidade mental de associação de idéias (LÖBACH, 2001).

O designer industrial, além de capacidade intelectual, deve possuir capacidade criativa, uma vez que tendo como base seus conhecimentos e experiências deve ser capaz de associar determinadas informações a solução de um problema através de novas relações. Para tanto, é preciso a observação de fatos sabidos sob novos pontos de vista assumindo uma postura crítica na procura de novas respostas a problemas antigos, despindo-se da segurança daquilo que é conhecido e comprovado. A exigência desta originalidade deve-se à indispensabilidade cada vez maior da inovação como um poderoso artifício para suplantar a competitividade de mercado (LÖBACH, 2001).

De acordo com o ICSID – Conselho Internacional das Organizações de Design Industrial, do inglês *International Council of Societies of Industrial Design* – o design é uma atividade dinâmica de criação que tem o intuito de estabelecer as características dos objetos, processos e serviços, sendo o fator central da inovação tecnológica e do intercâmbio cultural e econômico. Por meio da inovação, os produtos podem se tornar mais adequados para atender as necessidades dos usuários, possibilitando a eliminação ou redução de produtos complementares escassos ou dispendiosos e a melhoria da posição de mercado de uma empresa (ROMEIRO FILHO, 2010).

A inovação tecnológica não se limita apenas ao produto, pode estar associada ao processo produtivo, à estrutura organizacional ou à estratégia mercadológica. Quando relacionada a melhorias do processo produtivo, impacta também na diminuição de custos, gerando maior lucro à empresa (ROMEIRO FILHO, 2010). A busca desta inovação na tentativa de otimizar tempo e custos e melhorar a qualidade do produto respeitando também o ambiente requer uma metodologia de trabalho e de projeto. Porém, há de se salientar que esta metodologia não é absoluta ou fixa, podendo ser modificada caso sejam descobertas outras evidências que tragam um melhor resultado com um menor esforço (MUNARI, 2008).

Frequentemente materiais e técnicas são utilizados de uma maneira única ou de poucas maneiras. Por meio da experimentação, novas formas de aplicações de um material ou técnica podem ser descobertas. Destas experimentações resultam amostras, conclusões e conhecimento que podem gerar modelos demonstrativos de novas aplicações com finalidades particulares (MUNARI, 2008). Dessa forma, o conhecimento tecnológico progride por meio da transformação de produtos e processos produtivos já existentes, além da concepção e produção de novos produtos (ROMEIRO FILHO, 2010).

Percebe-se que atualmente uma empresa deve ter a capacidade de inovar continuamente. Para que a constante inovação seja atingida, o desafio contemporâneo é a união entre regra e emoção, estratégia e intuição. O design, que tem como base a coexistência da tecnologia e engenharia, da arte e humanismo, e da economia e gestão, é a ferramenta que torna possível esta integração. A introdução do design em uma empresa pode ser, portanto, o caminho para a inovação e um imperativo para o seu sucesso e sobrevivência (MARQUES, 2008).

Sendo o design uma atividade projetual de criação e execução de produtos que atendam às necessidades humanas e ambientais, e conjecturando-o como um importante fator da inovação tecnológica, ele poderia ser o instrumento de transformação dos resíduos madeireiros em um novo produto com valor estético e apreciativo agregado. Neste contexto é

ressaltada a técnica da marchetaria, cujos processos convencionais de produção se caracterizam pelo uso de ferramentas manuais, viabilizando a inovação por meio de um processo produtivo mais eficaz e lucrativo.

2.3 Marchetaria e seus processos atuais de corte

A marchetaria é uma técnica artística de revestimento de superfícies de móveis e elementos decorativos que combina lâminas de madeira de diferentes espécies, enaltecendo o material pelo contraste de suas cores e texturas revelado em desenhos diversos. Apesar de estas lâminas de madeira comporem a maior parte dos trabalhos de marchetaria, outros materiais de uso secundário também podem ser a elas associados. Dentre eles, metais (estanho e cobre), materiais gemológicos (quartzo, topázio, coríndon), nácar, marfim, chifres e casco de tartaruga (GIBERT, LÓPEZ e ORDOÑEZ, 2000).

A palavra marchetaria tem origem no termo francês *marqueter*, que significa embutir ou incrustar (GIBERT, LÓPEZ e ORDOÑEZ, 2000). Isto se deve ao fato de que, no princípio, esta milenar técnica de ornamentação tinha como procedimento inicial a realização de rebaixos nas superfícies dos móveis. Estes vazios eram posteriormente preenchidos com outras espécies de madeira, criando os desenhos de marchetaria. Durante o século XIX, a técnica original de esculpir o substrato onde eram incrustadas as peças da marchetaria para compor os desenhos submergiu. A preferência passou a ser uma técnica que permitia aplicar painéis marchetados finalizados sobre as superfícies. As composições de marchetaria passaram a ser inteiramente coladas e prensadas no mobiliário (RAMOND, 2000a).

Atualmente, para compor um desenho, o processo da marchetaria associa diferentes lâminas de madeira num mesmo plano, gerando uma superfície lisa e de igual espessura, que será posteriormente colada a um móvel ou elemento decorativo. A espessura destas lâminas pode variar entre 0,1 e 5 mm, dependendo do processo de produção empregado. Mediante o faqueamento de tábuas, as lâminas podem adquirir espessura entre 1 e 5 mm. Por processo de aplainamento, as lâminas são passíveis de apresentar espessura entre 0,5 e 1,5 mm, e através do processo de torneamento, onde uma tora é descascada por movimentos rotativos, as lâminas podem ter espessura entre 0,1 e 0,2 mm (GIBERT, LÓPEZ e ORDOÑEZ, 2000).

O ofício da marchetaria é, hoje em dia, realizado por um número pequeno de artesãos. O maquinário utilizado são ferramentas de corte, de perfuração, de percussão e extração, de aperto, de raspar e golpear e de prensar (GIBERT, LÓPEZ e ORDOÑEZ, 2000).

A seguir serão descritas algumas técnicas de marchetaria. Dentre elas a parqueteria; a *tarsia a incastro*, também chamada de técnica de Boulle; a técnica elemento por elemento; a técnica do corte bisel; e a marchetaria em bloco, também conhecida como *tarsia a toppo*.

2.3.1 Parqueteria

A parqueteria é uma técnica na qual lâminas de madeira de cores e/ou texturas contrastantes são cortadas em formas geométricas simples e arrançadas em um padrão de repetição alternando as espécies madeireiras. Uma vez que as formas são simples e idênticas, várias peças podem ser cortadas simultaneamente (KOPF, 2008).

As formas geométricas mencionadas compreendem polígonos regulares, como triângulos, quadrados, losangos, entre outros. Sendo conformados por linhas retas, eles podem ser cortados com uma ferramenta denominada serra de folhar (Figura 2A). Esta apresenta a borda dentada curva, permitindo o contato de poucos dentes com a lâmina de madeira de cada vez, diminuindo a possibilidade de danos. Estes dentes são caracterizados por não possuírem travamento (KOPF, 2008).

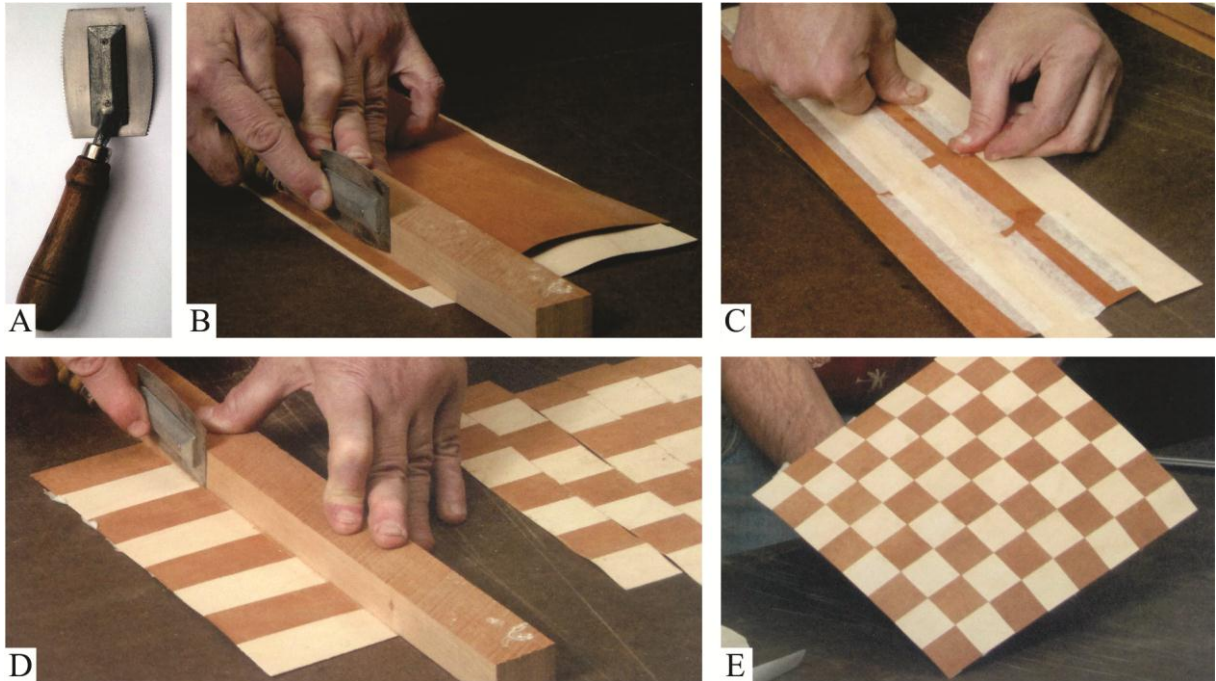
A serra de bancada elétrica também pode ser empregada no corte preciso e eficiente das peças de parqueteria, apesar de não ser comumente utilizada, já que pode lascar o material. Para esta operação de corte, uma chapa de compensado com um par de rolamentos parafusados ao fundo, que se encaixam nos trilhos da bancada, serve de suporte para as lâminas de madeira (Figura 3A). As lâminas são melhor estabilizadas, cobrindo-as com um pedaço de madeira. A serra é, então, levantada acima da espessura do suporte, gerando uma linha reta e precisa de corte sem lascas a lâmina (KOPF, 2008).

As composições de parqueteria, resultantes da disposição das formas geométricas cortadas a partir de lâminas de madeiras de diferentes espécies, são inúmeras. Um exemplo possível da parqueteria é o padrão xadrez. O processo tem início com o corte de finas tiras produzidas a partir de lâminas de madeira de duas espécies diferentes (Figura 2B). Estas tiras são, então, unidas umas às outras com o auxílio de uma fita adesiva, intercalando as espécies (Figura 2C). Elas são novamente cortadas, gerando o desenho de pequenos quadrados de cada espécie intercalados (Figura 2D). Estas tiras últimas conformadas pelos quadrados são unidas (Figura 2E), e resultam na composição final do xadrez (KOPF, 2008).

O chamado “Cubo Louis” é outro exemplo possível de composição da parqueteria. Este padrão é formado por losangos de 60/120 graus de três cores diferentes. Durante o processo, tiras são cortadas a partir de lâminas de madeira de três espécies diferentes (Figura

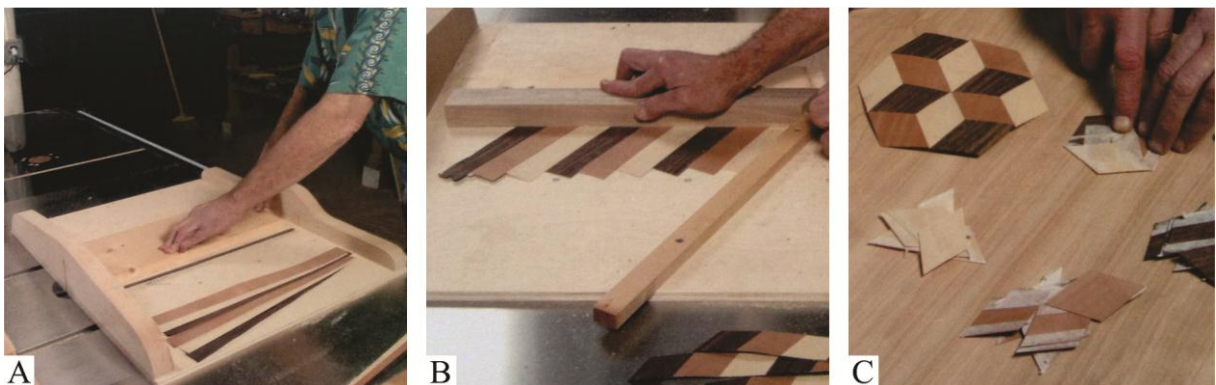
3A). Estas tiras são dispostas na angulação já mencionada com o auxílio de um gabarito (Figura 3B) e cortadas novamente, gerando pequenos losangos. Estes são dispostos intercalando as três espécies de madeira (Figura 3C) para formar o padrão “Cubo Louis” (KOPF, 2008).

Figura 2 – Técnica da parqueteria utilizando uma serra de folhar para os cortes – padrão xadrez.



(A) Serra de folhar; (B) Corte das tiras de madeira de duas espécies diferentes; (C) Colagem das tiras intercalando as duas espécies; (D) Corte do plano listrado com as tiras intercaladas; (E) Padrão xadrez.
Fonte: Adaptado de Kopf, 2008.

Figura 3 – Técnica da parqueteria utilizando uma serra de bancada para os cortes – padrão “Cubo Louis”.



(A) Corte das tiras com uma serra de bancada; (B) Alinhamento angular das tiras com o auxílio de um gabarito; (C) Montagem da composição “Cubo Louis” intercalando as peças das três espécies de madeira.
Fonte: Adaptado de Kopf, 2008.

2.3.2 *Tarsia a incastro* ou técnica de Boulle

A técnica *tarsia a incastro* é também denominada técnica de Boulle. O nome advém de um aclamado marceneiro, André-Charles Boulle (1642-1732), que durante o reinado de Luís XIV, produziu inúmeras peças com esta técnica para a família real ou principesca. Algumas das peças produzidas pelo artesão (Figura 4) fazem parte de coleções de museus mundialmente famosos (RAMOND, 2000a).

Esta técnica consiste em empilhar duas lâminas de materiais de cores contrastantes. Estas lâminas são serradas ao mesmo tempo, perpendicularmente à sua superfície, seguindo um desenho previamente traçado em uma folha de papel colada ao topo do conjunto (RAMOND, 2000a).

Figura 4 – Peças produzidas por André-Charles Boulle.



(A) Armário com o fundo em casco de tartaruga incrustado com estanho; (B) Interior da porta do armário com detalhes em estanho incrustados em amaranto e ébano; (C) Lateral de um outro armário com o fundo em bronze incrustado com casco de tartaruga e bordas em ébano. As peças estão no Wallace Collection, museu em Londres.

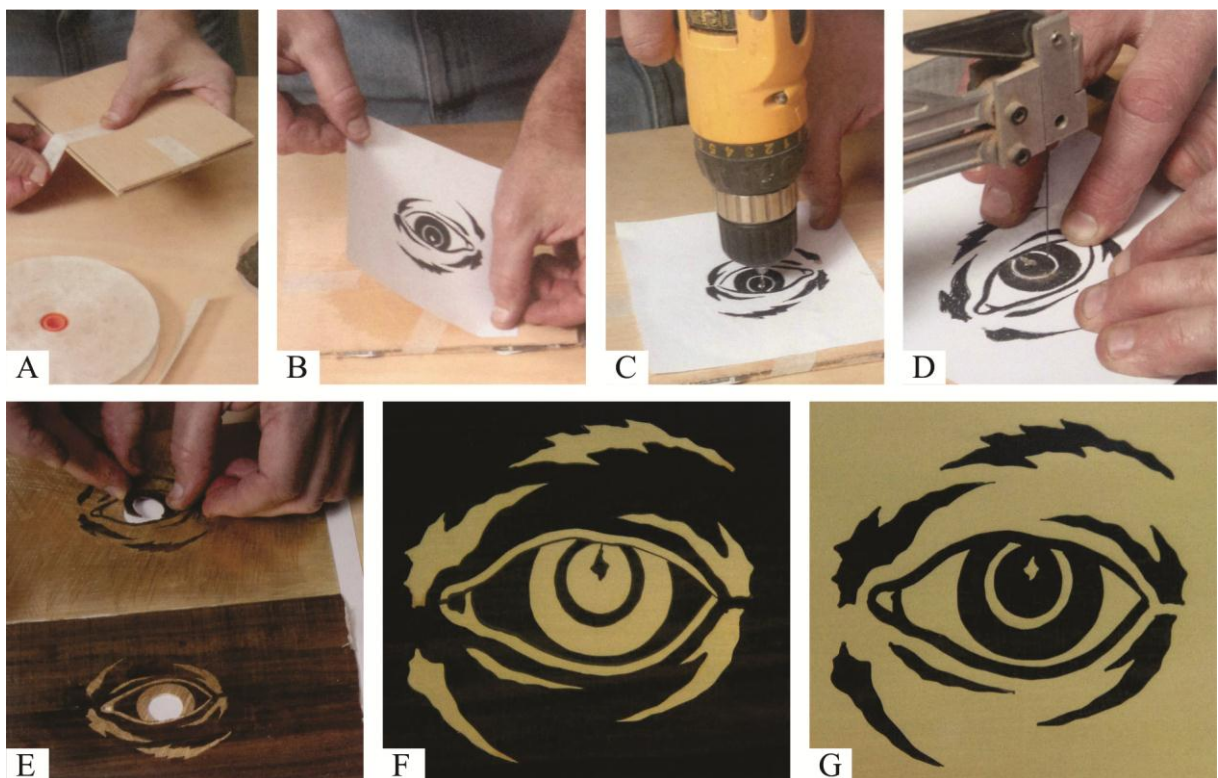
Fonte: Adaptado de Ramond, 2000a.

Para o processo de corte, as duas lâminas são cortadas com as mesmas dimensões, e unidas com a superfície superior na mesma orientação. Um papel de cera pode ser inserido entre elas para auxiliar na lubrificação e melhor desempenho da serra. Para maior precisão de corte e estabilidade do conjunto é colocada uma lâmina extra mais espessa na parte superior e outra na inferior, e o desenho é colado sobre o conjunto (Figura 5A e B). É feita, então, a perfuração de todas as partes independentes do desenho para a inserção da serra (Figura 5C). A ferramenta de corte utilizada normalmente é a serra tico-tico (Figura 5D). Para melhor acabamento, a lâmina de corte deve ser a mais fina possível evitando um espaçamento

excessivo entre as partes adjacentes. Estes espaços são geralmente preenchidos com uma mistura pastosa de serragem, tinta e cola (RAMOND, 2000b; KOPF, 2008).

Uma vez que o corte é concluído, o artesão separa as peças produzidas a partir das duas lâminas e une àquelas mais claras ao fundo escuro e vice-versa (Figura 5E). Desta forma, obtêm-se dois motivos decorativos: a composição com o desenho claro sobre o fundo escuro (Figura 5F) é chamada de primeira parte, a *partye*, enquanto à segunda composição (Figura 5G) é dado o nome de contraparte, *contre-partye* (RAMOND, 2000a).

Figura 5 – Técnica de Boule ou *tarsia a incastro*.



(A) Colagem do conjunto com uma lâmina mais espessa na parte superior e outra na inferior; (B) Colagem do desenho sobre o conjunto; (C) Perfuração para a entrada da serra; (D) Corte das peças com a serra tico-tico; (E) Montagem dos dois motivos; (F) Primeira parte (*partye*); (G) Contraparte (*contre-partye*).

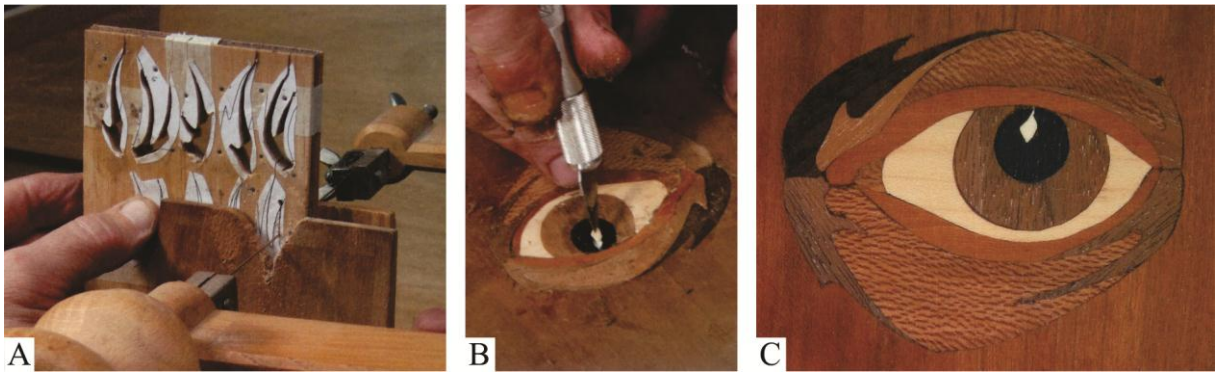
Fonte: Adaptado de Kopf, 2008.

As vantagens desta técnica são a criação de dois painéis concomitantemente e a diminuição do desperdício de material, uma vez que o único resíduo gerado é o que é transformado em serragem pelo movimento da serra (RAMOND, 2000a).

2.3.3 Técnica elemento por elemento

O método tradicional desenvolvido no século XVIII para o corte de várias peças é o chamado elemento por elemento. Nesta técnica, lâminas de diferentes espécies de madeira são sobrepostas umas às outras, e os desenhos traçados em uma folha de papel são colocados sobre o conjunto. O conjunto de lâminas é posteriormente cortado, seguindo os contornos dos desenhos um a um, gerando pequenas peças (Figura 6A). As composições finais são montadas com as pequenas peças variando as espécies de madeira (Figura 6B). O número de composições geradas (Figura 6C) é proporcional ao número de lâminas de madeira do conjunto cortado (KOPF, 2008).

Figura 6 – Técnica elemento por elemento.



(A) Peças sendo cortadas uma a uma; (B) Montagem da composição com as partes de diferentes espécies; (C) Uma das composições finais da técnica.

Fonte: Adaptado de Kopf, 2008.

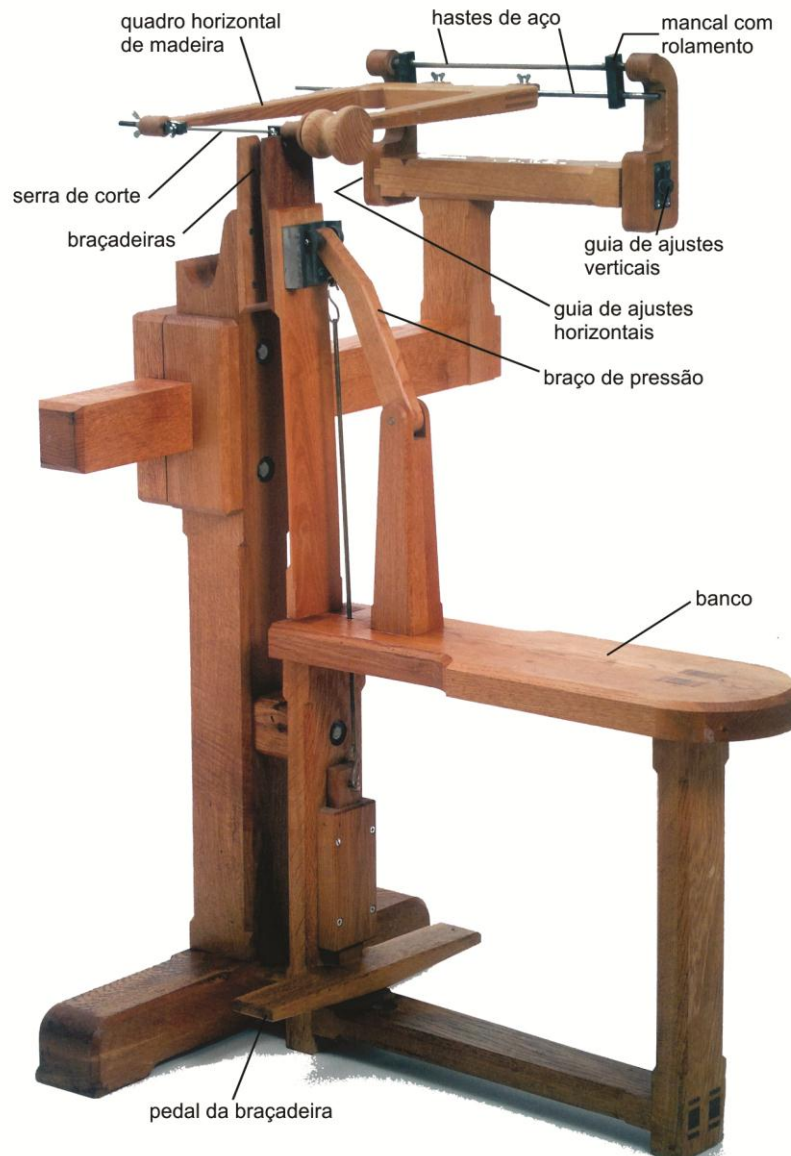
Estas pequenas peças podem ser frágeis e de difícil precisão de corte, principalmente quando as fibras da madeira são curtas. Para auxiliar na união das fibras e evitar que as peças lasquem, as lâminas podem ser reforçadas colando uma folha de papel sobre a superfície. Assim como na técnica *tarsia a incastro*, uma lâmina extra mais espessa é colocada na parte superior e outra na parte inferior do conjunto para suporte. Folhas de papel de cera também podem ser adicionadas entre as lâminas como meio de lubrificar a serra, para melhor funcionamento da mesma (KOPF, 2008).

O número de lâminas de madeira utilizadas pode variar. Quanto maior for este número, mais composições podem ser produzidas, porém mais difícil se torna o corte do conjunto. As lâminas, em todos os desenhos, são perfuradas para a inserção da serra e realização dos cortes. O conjunto de lâminas que servirá de fundo para as pequenas peças cortadas é produzido da mesma maneira (KOPF, 2008).

Ainda, quanto maior for o número de lâminas sobrepostas, maior tem de ser a espessura da serra de corte. E quanto mais espessa a serra de corte, maior o espaçamento gerado entre as peças que compõem o desenho. Além disso, o corte deve ser efetuado de forma perpendicular ao conjunto de lâminas, caso contrário as peças apresentarão variação dimensional entre as lâminas, do topo à base do conjunto. A técnica requer, portanto, grande precisão de corte (KOPF, 2008).

Para a resolução destas questões, foi desenvolvida no século XIX uma ferramenta denominada cavalete de marchetaria (Figura 7). Esta ferramenta apresenta uma série de possíveis ajustes que permitem a precisão necessária para obter cortes de qualidade (KOPF, 2008).

Figura 7 – Cavalete de marchetaria com indicação das partes constituintes.



Fonte: Adaptado de Kopf, 2008.

O funcionamento da ferramenta se dá a partir de uma serra de corte que permanece em tensão em um quadro horizontal de madeira. Conectado à parte traseira do quadro está uma haste de aço que se encaixa em um mancal com rolamento, permitindo que a serra deslize para trás e para frente. A haste de metal fica presa a uma base que permite alguns movimentos para os lados, auxiliando na execução da linha de corte. Os braços desta base têm dois ajustes: do lado da serra, o braço pode ser levantado ou abaixado; e do outro lado, pode ser movimentado para a esquerda ou direita. Com esses dois ajustes a lâmina de serra pode correr exatamente perpendicular à peça a ser cortada, ou em outro ângulo qualquer que seja necessário (KOPF, 2008).

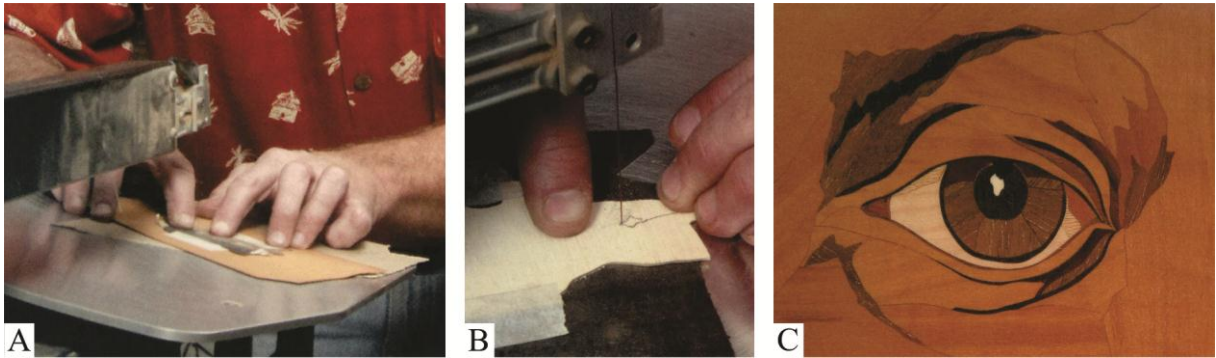
2.3.4 Técnica do corte bisel

O corte bisel é uma técnica de marchetaria que pode facilmente produzir um desenho complexo, sem espaços entre as peças. O processo se assemelha à técnica de Boulle, na qual a linha por onde passa a serra se torna a fronteira entre duas peças. Porém, ao invés do corte ser perpendicular à superfície das lâminas, o corte é feito angularmente. Quando a composição é montada (Figura 8C), o espaçamento entre as peças adjacentes, produzido pela serra, é eliminado devido ao corte diagonal do conjunto. Com a técnica do corte bisel é possível, portanto, alcançar extrema precisão na junção dos elementos de marchetaria (RAMOND, 2000b; KOPF, 2008).

O ângulo de corte depende da espessura das lâminas de madeira e da espessura da serra cortante. Quanto mais fina a lâmina da serra, mais vertical deve ser o corte. Por outro lado, quanto mais fina a lâmina de madeira, mais angulado deve ser o corte. A posição do instrumento é simples de ser determinada quando as espessuras das lâminas são regulares. Em marchetarias antigas, é possível encontrar intersecções irregulares devido às desigualdades nas espessuras das lâminas, que eram serradas manualmente (RAMOND, 2000b; KOPF, 2008).

O corte angulado pode ser feito utilizando um serrote de mão, mas sua execução é facilitada pelo uso de uma serra tico-tico (Figura 8A e B). A mesa que compõe o equipamento pode ser inclinada no ângulo adequado, e a mobilidade do artesão para manusear a lâmina de madeira através da serra é maior (KOPF, 2008).

Figura 8 – Técnica do corte bisel.



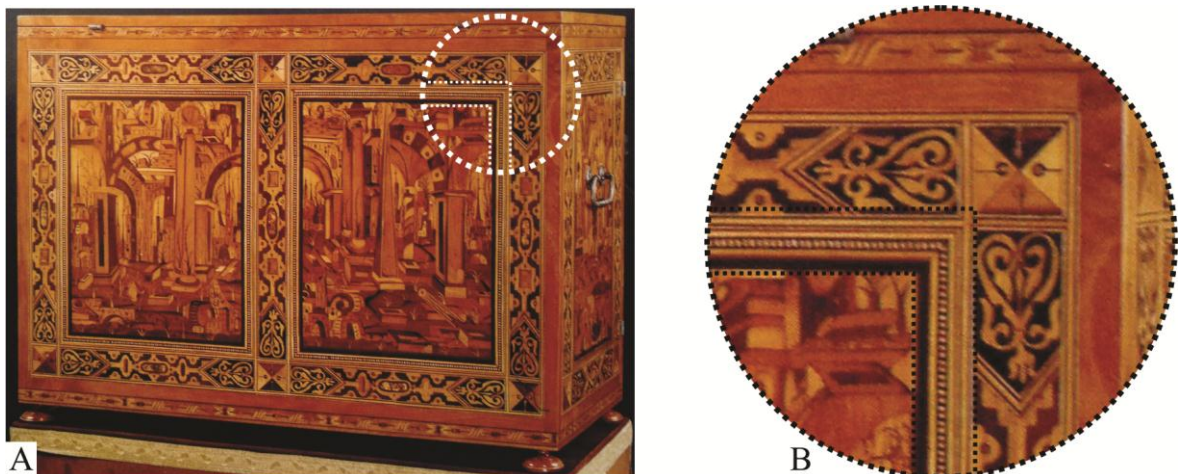
(A); (B) Corte angular efetuado com o auxílio de uma serra tico-tico;
(C) Peça finalizada sem espaçamento entre as peças adjacentes.

Fonte: Adaptado de Kopf, 2008.

2.3.5 Marchetaria em bloco ou *tarsia a toppo*

A técnica da marchetaria em bloco foi desenvolvida no século XVI, quando alguns artesões começaram a envolver seus painéis marchetados com molduras em padrões geométricos (Figura 9). No início, as minúsculas peças eram cortadas separadamente e aplicas ao contorno dos painéis, um processo extremamente trabalhoso e de minuciosa precisão. Para o aprimoramento da fabricação destes filetes decorativos complexos, estes artesãos criaram a técnica da marchetaria em bloco, também chamada de *tarsia a toppo* (RAMOND, 2000a).

Figura 9 – Painéis marchetados com molduras em padrões geométricos.

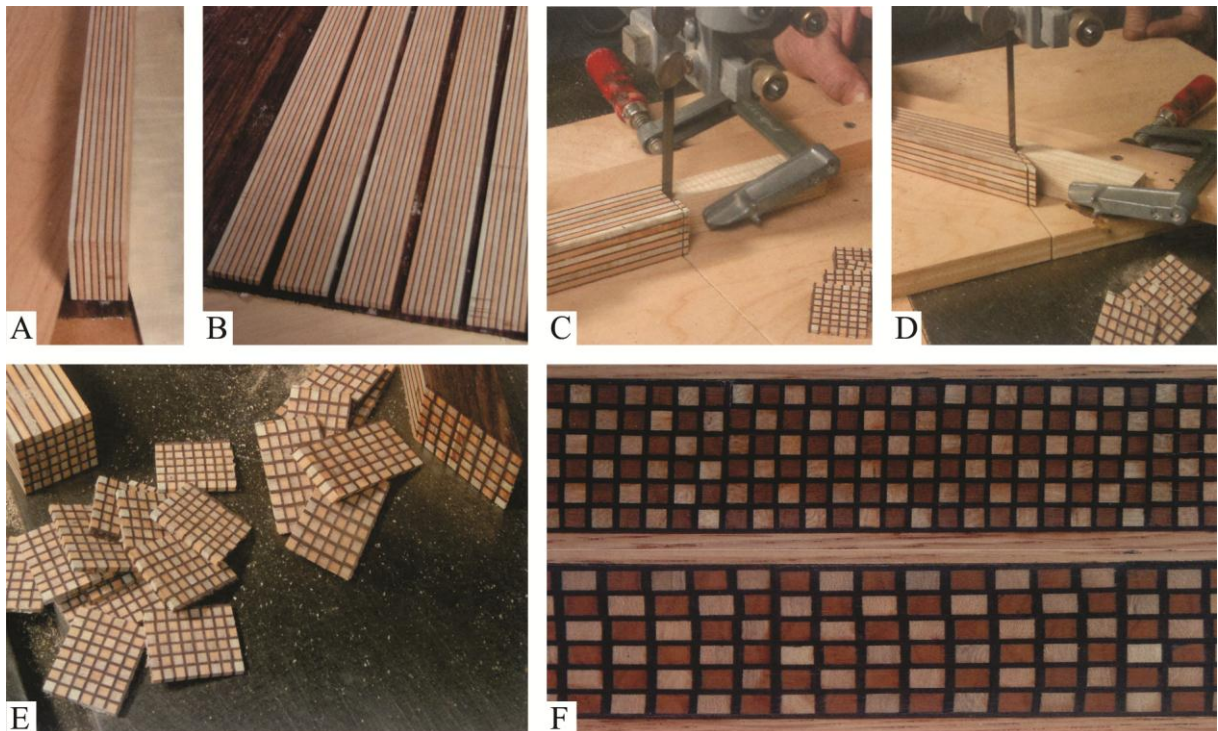


(A) Baú do século XVII (93 x 76 x 40 cm); (B) Detalhe da moldura da porta do baú.

Fonte: Adaptado de Ramond, 2000a.

A técnica é, portanto, baseada na criação de um sistema onde várias peças podem ser cortadas a partir de um bloco de lâminas de madeira, de cuja seção transversal mostra o motivo geométrico desejado para a execução da moldura. O processo consiste no corte de lâminas estreitas de madeiras de espécies com tonalidades e/ou texturas contrastantes. Estas lâminas são dispostas em um padrão alternado de espécies e, prensadas entre duas peças de madeira, são coladas, originando um bloco que evidencia listras na sua seção transversal (Figura 10A). Este bloco é novamente cortado (Figura 10B), e as finas lâminas listradas produzidas são reorganizadas e coladas umas às outras para criar diferentes configurações que aparecem na seção transversal no novo bloco gerado. A peça é então cortada em finas lâminas produzindo um conjunto de módulos idênticos (Figura 10C e E) que podem ser organizados em faixas para compor as molduras (Figura 10F). A peça pode também ser cortada em ângulo (Figura 10D e E), transformando os quadrados em retângulos, sugerindo uma infinidade de possibilidades de desenhos para as molduras (RAMOND, 2000a; KOPF, 2008).

Figura 10 – Técnica da marchetaria em bloco ou *tarsia a toppo*.



(A) Lâminas de espécies diferentes intercaladas formando um bloco; (B) Finas lâminas listradas; (C) Corte perpendicular do bloco; (D) Corte angular do bloco; (E) Blocos e os módulos produzidos; (F) Molduras.

Fonte: Adaptado de Kopf, 2008.

2.4 Processo de corte a laser para a marchetaria

Uma das grandes descobertas do século XX, em termos de processos de corte, é a tecnologia do corte a laser. Este processo de alta precisão, certamente, se tornará amplamente aplicável no âmbito da marchetaria em um futuro próximo (RAMOND, 2000b).

O LASER (abreviação para *Light Amplified by Stimulated Emission Radiation*) tem o seu funcionamento baseado nas leis fundamentais da interação da radiação luminosa com a matéria. Sendo um instrumento de altíssima precisão geométrica, tem encontrado vasta aplicabilidade em diversas áreas (BAGNATO, 2008). No âmbito do PGDesign/UFRGS, alguns trabalhos foram desenvolvidos nesta temática: o estudo de parâmetros de corte a laser em couro e chapas de chifre para a confecção de joias (STÜRMER, 2010), a aplicação do corte a laser em chapas de acrílico (PMMA) e lâminas de madeira da espécie cedro (*Cedrella fissilis*) para o design de superfícies táteis (SILVEIRA, 2011), e a padronização do processo de gravação a laser em ágata com aplicação no design de joias (CIDADE, 2012).

As tarefas desempenhadas pelo laser podem ser ordenadas de acordo com o valor de potência necessário para o seu efetivo resultado. O corte e a perfuração são as mais exigentes em termos de potência, que deve ser suficiente para vaporizar o material. Menos potência é necessária para o processo de gravação de uma peça já que somente uma camada de superfície será vaporizada. Quando a potência do laser é ainda menor, o material pode não vaporizar, e sim derreter. Neste caso, o laser funciona como uma ferramenta de soldagem, empregada para a união de dois elementos metálicos. Potências menores ainda podem ser utilizadas para o tratamento térmico ou de recozimento de uma peça, onde a estrutura interna do material é alterada por aquecimento sem acontecer a fusão (HECHT e TERESI, 1998).

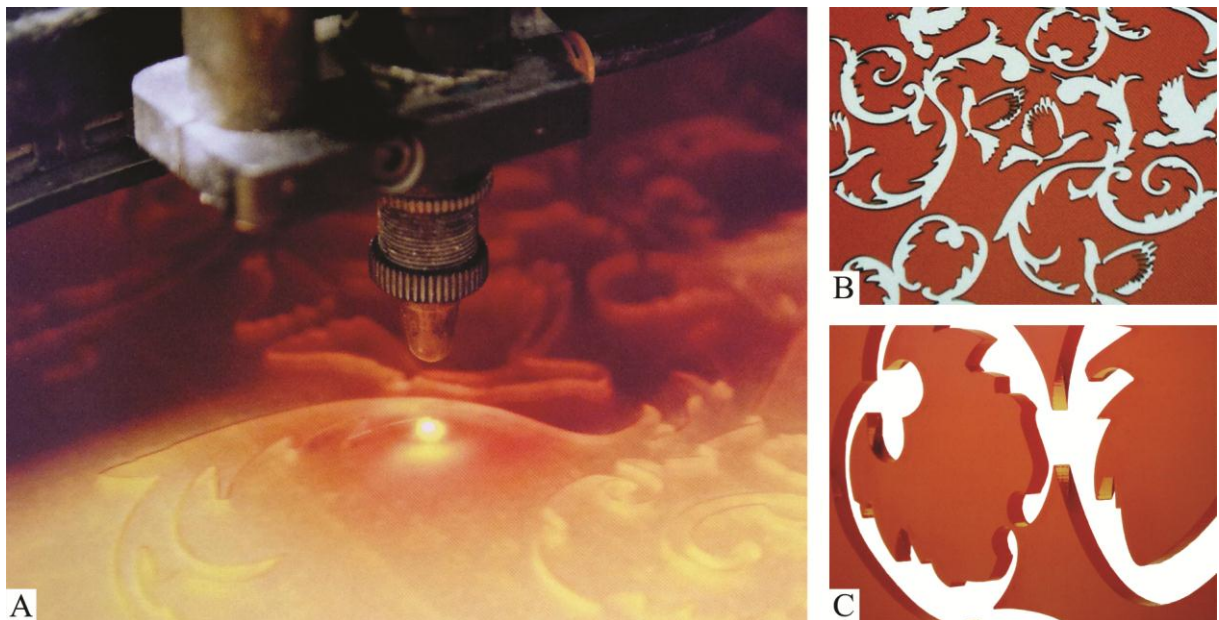
O funcionamento dos lasers pode se dar por transferência de energia pulsada ou contínua. Aqueles de transferência de energia pulsada são geralmente usados para a perfuração, devido à necessidade de curtas e intensas rajadas para a execução do furo. A solda e o corte podem ser feitos com lasers de transferência de energia contínua ou pulsada. Enquanto o tratamento térmico é geralmente feito com lasers de transferência de energia contínua (HECHT e TERESI, 1998).

A maioria dos materiais exige altas potências para que estas tarefas sejam desempenhadas, e quatro tipos de lasers comerciais apresentam potência suficiente: de Neodímio-Itrio-Alumínio-Granada (Nd-YAG), Neodímio-Vidro (Nd-Glass), Rubi (Al_2O_3) e Dióxido de Carbono (CO_2). Destes, o Nd-YAG e o CO_2 podem ser feitos para operar em pulsos ou continuamente, ao passo que os do tipo Al_2O_3 e Nd-glass podem trabalhar apenas

em pulsos. Os lasers que funcionam a base do dióxido de carbono podem produzir os mais potentes feixes contínuos (HECHT e TERESI, 1998).

Dentre as tarefas passíveis de serem desempenhadas pelo laser já descritas, a sua utilização como agente erosivo (Figura 11) é destacada, e vem sendo largamente aplicada uma vez que possibilita a concentração do feixe em superfícies muito pequenas, com tamanhos e formas geométricas precisas (HAN, GUBENCU e PILLON, 2005). A propriedade do laser em ser um instrumento de corte preciso se dá por suas características de baixa divergência e muita concentração de energia, aliadas ao fato do feixe de luz percorrer em linha reta. Além disso, a vaporização do material o torna ainda mais preciso (BAGNATO, 2008).

Figura 11 – Processo de corte a laser em lâmina de acrílico (PMMA) de 3 mm de espessura.



(A) Execução do corte a laser; (B) Peça finalizada; (C) Detalhe da peça finalizada.

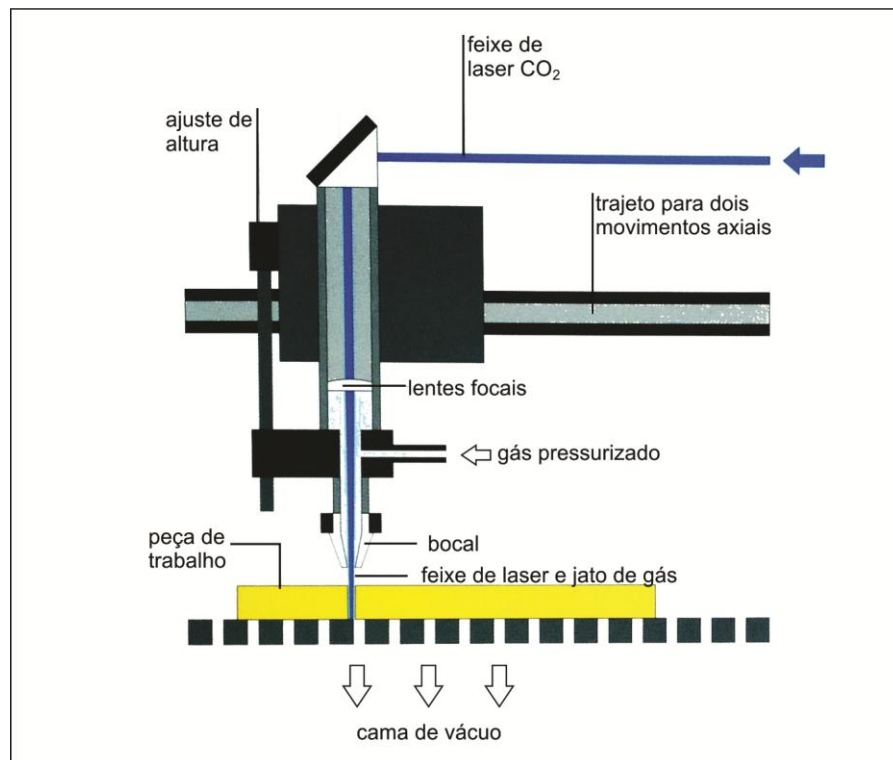
Fonte: Adaptado de Thompson, 2011.

Geralmente no equipamento para o processo de corte a laser (Figura 12) há um jato de gás soprando sobre a região que está sendo cortada. O seu propósito é se desfazer do material vaporizado, soprando-o para fora do trajeto do corte antes que interfira no processo ou se instale no sistema óptico do laser, podendo danificá-lo. O gás é geralmente ar ou um gás quimicamente não-reativo, tal como argônio. Este último é usado quando existe a possibilidade de um incêndio ou explosão (HECHT e TERESI, 1998).

O processamento a laser acontece por meio de uma transferência controlada de energia, condicionada e intermediada pela incidência do feixe e por sua absorção na superfície da peça trabalhada. As características dos efeitos causados pela radiação a laser na peça

dependem, portanto, das propriedades do material de que ela é feita, da intensidade do feixe de laser e do tempo de interação entre eles. Como já mencionado, dentre as variáveis associadas ao feixe de laser que representam fatores reagentes no sistema, as mais importantes são: potência, tempo, comprimento de onda, tamanho do ponto focal e disposição espacial. Os processos tecnológicos baseados na remoção de material foram desenvolvidos tendo como parâmetros a intensidade do feixe e o tempo de interação (HAN, GUBENCU e PILLON, 2005).

Figura 12 – Esquema ilustrativo do equipamento de corte a laser.



Fonte: Adaptado de Thompson, 2011.

Dentre os benefícios do uso do laser estão a ausência de desgaste de ferramentas e de danos materiais, passíveis do processamento mecânico, e as possibilidades de micro-processamento e de automação. A utilização do laser pode assegurar as condições necessárias para aumentar a qualidade das peças trabalhadas e a taxa de produção (HAN, GUBENCU e PILLON, 2005). Em contrapartida, na região do corte existe, além da porção de material removida, uma área na sua adjacência que é afetada pelo calor. Essa área surge devido à grande quantidade de energia depositada para vaporização do material, podendo aquecer levemente as laterais (BAGNATO, 2008). Além disso, peças de grande espessura podem dificultar, ou mesmo inviabilizar, o uso deste processo (HAN, GUBENCU e PILLON, 2005).

O corte a laser é atualmente utilizado por uma empresa do leste da França que fabrica painéis marchetados com composições geométricas. Os produtos desta empresa são, na sua maioria, mosaicos com um padrão bastante complexo, onde os elementos se encaixam perfeitamente um ao outro. Tendo em vista que esta tecnologia não é muito difundida na marchetaria, seu potencial para o aperfeiçoamento da técnica ainda é de difícil avaliação. Porém, uma constatação possível a respeito do emprego da tecnologia do corte a laser é que as lâminas de madeira, cortadas uma a uma, têm suas bordas escurecidas pela ação do feixe de laser, gerada pela queima do material. O escurecimento pela queima é bastante visível em espécies de madeira de tons claros e menos evidentes naquelas de tons escuros. Além disso, percebe-se que os elementos encaixáveis podem ser unidos de maneira eficaz, tendendo a indicar a precisão deste processo de corte. Apesar destas observações iniciais, ainda não foi desenvolvida uma composição de marchetaria feita a partir de peças cortadas a laser cuja qualidade possa ser comparada a um engenhoso trabalho feito pelos processos de corte convencionais (RAMOND, 2000b). Ressalta-se que para a avaliação do potencial de aplicação do processo de corte a laser em madeiras, visando o aperfeiçoamento da técnica da marchetaria, é necessário também o conhecimento das características e propriedades do material.

2.5 Anatomia, propriedades e técnicas de caracterização da madeira

Segundo Downes *et al.* (2009), há muitas razões pelas quais é importante compreender a natureza e as causas das variações das propriedades das madeiras. Utilizada como matéria-prima na confecção de inúmeros produtos, a variação de suas propriedades é um dos principais determinantes das características e comportamentos destes produtos. Além disso, o conhecimento do material é de extrema necessidade para a escolha adequada da tecnologia de fabricação dos mesmos. Gibbs (2006) esclarece que inexitem duas espécies de madeira iguais, já que cada uma delas se distingue das demais mediante uma complexa combinação de características. Estas distinções podem ser fruto da genética de uma dada espécie, e comum a todos os seus exemplares, ou resultado das circunstâncias do meio (tipo de solo, topografia e clima), e, portanto, exclusivas a cada espécime individual.

Para que as propriedades e o comportamento da madeira sejam compreendidos, torna-se interessante o entendimento da forma como crescem as árvores. O tronco de uma árvore pode ser descrito, simplificarmente, como uma pilha de cones superpostos. Uma vez que o ciclo de crescimento das árvores relaciona-se às estações do ano, quando bem definidas

e divididas nas etapas primavera/verão e outono/inverno, a passagem de cada ano sobrepõe, em média, mais dois cones à pilha. O lenho inicial, mais claro e de maior espessura, e o lenho tardio, mais denso e escuro. Cortado transversalmente, o tronco acaba por apresentar um desenho de círculos concêntricos, os chamados anéis de crescimento (GONZAGA, 2006).

Deste modo, dentro de cada anel de crescimento anual, existem duas zonas bem definidas. Durante a primavera quando a temperatura e o fotoperíodo são favoráveis para o crescimento vegetal é produzido o lenho inicial, e quando o câmbio, principal responsável pelo crescimento diametral vegetal, é menos ativo, é formado o lenho tardio. O lenho inicial, produzido tanto em árvores jovens (até os primeiros 5-20 anos de vida) e nas partes jovens das árvores mais velhas, apresenta uma menor densidade e maior ângulo de microfibrilas: a árvore jovem pode curvar-se, por exemplo, sob a ação do vento, sem quebrar. Já o lenho tardio é mais denso devido às fibras menores com paredes celulares mais espessas e lúmen celular menor. O ângulo de microfibrilas é mais baixo e a madeira é mais rija (DÉJARDIN *et al.*, 2010). Ainda, em se tratando da diferenciação da densidade entre estas duas zonas, Walker (2007) afirma que as células do lenho inicial apresentam paredes delgadas e interstícios maiores, enquanto que as células do lenho tardio revelam paredes espessas e interstícios menores.

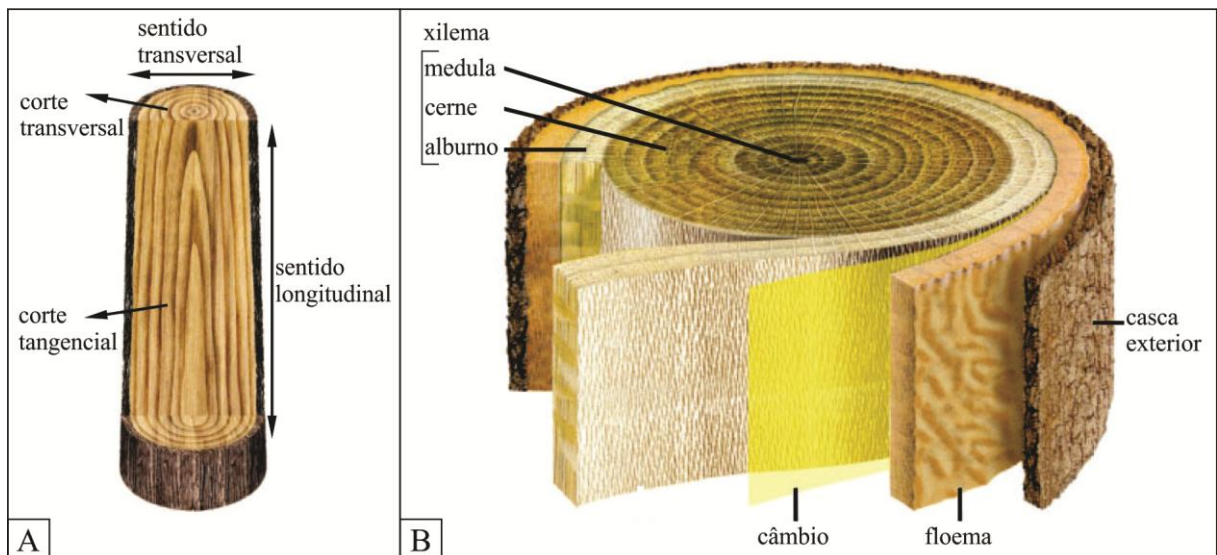
Os anéis de crescimento podem evidenciar também a presença da chamada madeira de reação. Esta madeira se forma como resposta a determinados estímulos ambientais como o vento, a declividade e a luz. A árvore, buscando reorientar os seus eixos e manter o seu equilíbrio, origina uma madeira de estrutura e composição química especial com propriedades mecânicas específicas. Assim, para determinar as propriedades das madeiras, dentre elas, a resistência à tração, compressão e flexão, a dureza, a capacidade de absorção e eliminação de umidade e a estabilidade dimensional, especialistas da madeira estudam o número de anos de crescimento da árvore e as características deste crescimento, considerando a largura de cada anel de crescimento e a proporção entre lenho inicial e lenho tardio (WALKER, 2007).

Visualmente, os desenhos das faces das madeiras diferem entre si de acordo com o seccionamento dos anéis de crescimento da árvore. Os cortes dos troncos podem ser feitos nos sentidos longitudinal e transversal (Figura 13A). Serrado transversalmente aos anéis de crescimento, o tronco revelará círculos concêntricos, com alternância entre claros e escuros. Serrado longitudinalmente, os cortes podem ser divididos em tangencial e radial. No corte tangencial, isto é, secante aos anéis de crescimento, o tronco revelará curvas alongadas, cujos vértices apontam para o topo da tora, também intercalando claros e escuros. No corte radial, ou seja, feito da periferia para o centro acompanhando o sentido dos raios dos anéis de

crescimento, o desenho formado apresentará estes anéis como linhas paralelas, e os raios seccionados, como pequenas faixas transversais de maior ou menor comprimento (GONZAGA, 2006). É importante ressaltar que o contraste em densidade do lenho inicial e tardio evidenciados nos anéis de crescimento pode causar dificuldades para serrar a madeira, já que as ferramentas por vezes desviam de sua trajetória original quando encontram uma porção mais dura (GIBBS, 2006).

Outro item que contribui na formação das características físicas e visuais da madeira é o tecido fibroso. Quando muito revesso, este tecido confere um aspecto bruto à madeira. As fibras têm orientação contrária ao corte da peça, gerando um aspecto áspero. Mesmo que aplainada e lixada, a superfície não se torna lisa. Contrariamente a isto, quando o tecido fibroso é pouco revesso, a superfície da peça pode adquirir um aspecto liso, acetinado e lustroso. Além disso, algumas madeiras apresentam coloração bem peculiar, ou mesmo manchas marcantes. Percebe-se a existência de uma infinidade de desenhos e colorações nas variadas espécies vegetais produtoras de madeira. Cada um deles apresentando propriedades e características físico-químicas diferentes (GONZAGA, 2006).

Figura 13 – Desenho esquemático do tronco de uma árvore.



(A) Tronco com os anéis de crescimento seccionados mostrando os cortes longitudinal, transversal e tangencial; (B) Seção transversal de um tronco com suas camadas componentes.

Fonte: Adaptado de Gonzaga, 2006.

A seção transversal de um caule (Figura 13B), além de apresentar os chamados anéis de crescimento, é composta pelas seguintes camadas: casca exterior, floema, câmbio e xilema. Esta última se divide em alburno, cerne e medula. Cada uma destas camadas tem sua função específica. A casca exterior protege o tronco; o floema transporta a seiva elaborada para o

câmbio e albúrnio; o câmbio, de espessura microscópica, é responsável pelo crescimento diametral do tronco, gerando um anel exterior para o floema, e um interior para o xilema; e o xilema é a madeira propriamente dita, onde o albúrnio é a camada mais externa e o cerne, a interna. O albúrnio, de tecido mais brando e claro, transporta a seiva vinda das raízes e o cerne, formado pela deposição de resinas, óleos e ceras, representa a madeira com suas cores, características e desempenho conhecidos (GONZAGA, 2006).

As árvores estão classificadas dentro de duas categorias botânicas, as gimnospermas e as angiospermas, ambas com características peculiares em relação a seu arranjo celular (WALKER, 2007). A análise do modo como se arranjam tridimensionalmente os tipos de células formando os complexos tecidos da madeira traz informações sobre o comportamento do material. As fibras, o tipo e o volume de células e os tamanhos e números de vasos é bastante variável entre as espécies arbóreas. Além desta variação natural biológica, o padrão, e conseqüentemente o comportamento, da madeira é modificável, como visto, sob diferentes fatores ambientais (DÉJARDIN *et al.*, 2010).

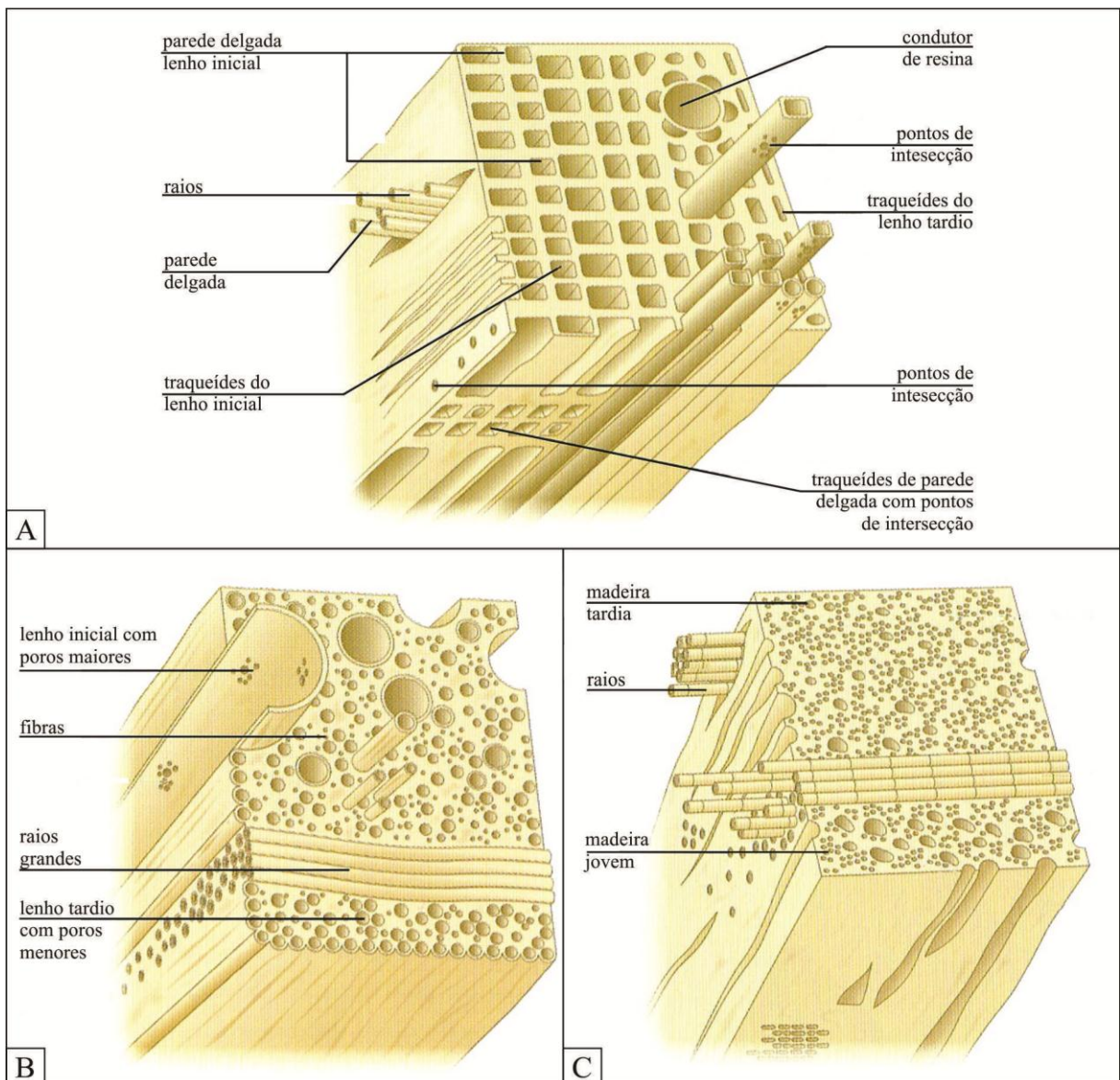
As células, fibras e vasos da madeira estão envolvidos em três funções básicas: condução de água, armazenamento e condução de nutrientes, e suporte mecânico. Nas angiospermas, vasos e fibras estão envolvidos, respectivamente, na condução de água e no suporte mecânico, enquanto as células parenquimáticas, organizadas em raios, estão envolvidas no armazenamento temporário e na transferência radial de nutrientes entre floema e xilema. A madeira das angiospermas é, portanto, heterogênea. Diferentemente das angiospermas, a madeira das gimnospermas e de algumas angiospermas primitivas, é homogênea e mais uniforme em sua estrutura, uma vez que as células denominadas traqueídes são responsáveis tanto pela condução de água e nutrientes quanto pelo suporte mecânico (DÉJARDIN *et al.*, 2010).

As células traqueídes são finas e de extremidade arredondada. Elas sobrepõem-se umas às outras, de maneira a criar maior número de pontos de intersecção, permitindo uma melhor fluidez da seiva (Figura 14A). As traqueídes do lenho inicial têm paredes mais delgadas, interstícios maiores e maior número de pontos de intersecção. Enquanto as traqueídes do lenho tardio apresentam paredes mais espessas e interstícios e pontos de intersecção menores já que sua função é proporcionar resistência mecânica (WALKER, 2007).

Nas angiospermas, as fibras são compostas por células de parede espessa com pontos de intersecção minúsculos que se estreitam bruscamente nas extremidades. Elas formam a maior parte do tecido lenhoso. As células dos vasos condutores apresentam paredes delgadas,

ficam empilhadas umas sobre as outras e suas extremidades são abertas. Nas seções transversais, estas células são vistas como poros. Quando os poros do lenho inicial são maiores que os do lenho tardio formando anéis de crescimento bem definidos (Figura 14B), dá-se o nome de “madeira com anéis porosos”. Já quando os poros estão dispersos pelos anéis de crescimento e a diferença entre os do lenho inicial e os do lenho tardio é pequena (Figura 14C), a madeira é conhecida como “madeira de porosidade difusa” (WALKER, 2007).

Figura 14 – Estrutura celular da madeira.

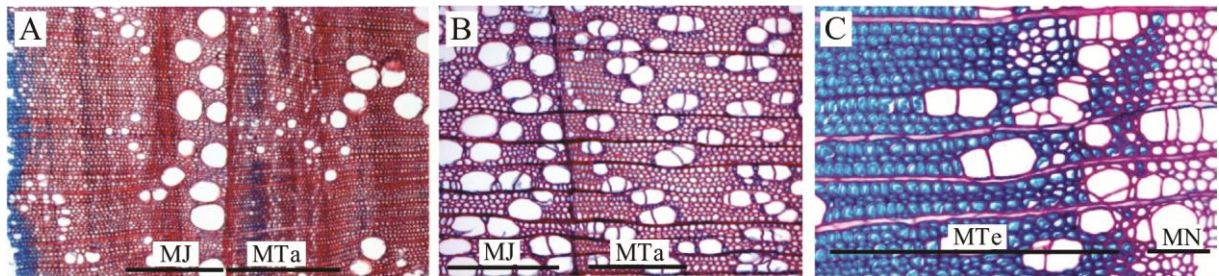


(A) Estrutura celular das gimnospermas e angiospermas primitivas; (B) Estrutura celular das angiospermas - madeira com anéis porosos; (C) Estrutura celular das angiospermas - madeira de porosidade difusa.

Fonte: Adaptado de Walker, 2007.

Os tecidos da madeira resultam, portanto, do arranjo de variados tipos, tamanhos e quantidades de células, vasos e fibras, diferenciando-se entre as espécies arbóreas e respondendo aos fatores ambientais a que estão submetidas (DÉJARDIN *et al.*, 2010). A Figura 15 mostra a diferença entre a madeira jovem, tardia, normal e de tensão de duas espécies arbóreas, castanheiro e álamo, ambas angiospermas.

Figura 15 – Tecido de diferentes espécies de madeira.



(A) Espécie castanheiro; (B, C) Espécie álamo. Seções transversais tingidas com safranina/astra azul, mostrando diferenças relacionadas ao tamanho e número dos vasos, e ao tamanho e parede celular secundária das fibras, entre madeira jovem (MJ), madeira tardia (MTa), madeira normal (MN) e madeira de tensão (MTe).

Fonte: Adaptado de Déjardin *et al.*, 2010.

Assim como os tecidos da madeira são formados pelo agrupamento de variados tipos de células, estas são organizadas por outros componentes menores. A madeira é composta principalmente de celulose, lignina e hemicelulose. Destes, a celulose é o principal constituinte, representando até 50% da composição. As moléculas de celulose estão dispostas estruturalmente em fibras, que por sua vez estão organizadas em elementos estruturantes maiores que constroem a parede celular. A lignina é o segundo componente mais prevalente na madeira e atua como um agente de cimentação entre as células individuais. O teor de lignina varia notavelmente entre madeiras ditas macias (25-33%) e madeiras ditas duras (18-25%). Já a hemicelulose fornece o elo crítico entre a celulose e os polímeros de lignina (LEEUWEN *et al.*, 2011).

A madeira também pode ser dividida em componentes inorgânicos e orgânicos. Os constituintes inorgânicos mais abundantes são cálcio, potássio, nitrogênio, fósforo e magnésio. Entretanto, ainda podem ser encontradas pequenas quantidades de sódio, ferro, silício, manganês, cobre e zinco. Os componentes orgânicos são os óleos, resinas, taninos, ceras, gomas e amido. Estes contribuem para as características de odor, cor, densidade, resistência contra apodrecimento, higroscopia e inflamabilidade da madeira (LEEUWEN *et al.*, 2011).

No decorrer dos anos, alguns estudos têm sido realizados a fim de medir a variabilidade das propriedades das madeiras possibilitando um uso mais racional do material (DOWNES *et al.*, 2009). A NBR7190/1997: Projeto de estruturas de madeira, da Associação Brasileira de Normas Técnicas, estabelece a caracterização das propriedades físicas e mecânicas para espécies de madeira conhecidas e não conhecidas. Porém, a realização dos ensaios constantes nesta norma requer laboratórios especializados, com equipamentos específicos de grande porte e custos elevados. Este contratempo faz com que a madeira seja utilizada sem o conhecimento prévio de suas propriedades, levando, muitas vezes, ao seu mau uso e desperdício (DIAS e LAHRS, 2004).

Todavia, a densidade aparente, uma das propriedades físicas descritas na norma, é de simples medição, uma vez que é definida pela razão entre a massa e o volume da madeira a 12% de umidade. De posse das amostras, é necessário apenas uma balança de precisão e um paquímetro. Tal propriedade relaciona-se a várias questões de desempenho do material e dos produtos confeccionados a partir dele (DIAS e LAHRS, 2004). A densidade aparente é uma característica importante, por exemplo, na definição da adequada tecnologia a ser empregada na fabricação dos produtos madeireiros, pois é um indicador da relação madeira-poros presente em cada amostra e da trabalhabilidade do material. Esta propriedade também se relaciona a outras, como a resistência mecânica, a organização dos componentes da anatomia da madeira e do número, tamanho e composição química das células (NOGUEIRA, NELSON e FEARNSSIDE, 2005).

Além desta, a determinação da densidade básica também é de fundamental importância já que possui relação com as propriedades de resistência mecânica e de estabilidade dimensional. Esta última está associada ao grau de retração e inchamento da madeira, que correspondem às alterações na quantidade de água de impregnação, ou seja, secagem máxima ou ganho de umidade até que o ponto de saturação seja atingido. Normalmente, a maior variação dimensional, causada pela perda ou ganho de umidade, ocorre no sentido tangencial aos anéis de crescimento, seguida pela alteração advinda do sentido radial, sendo praticamente desprezível aquela que se dá no sentido longitudinal das fibras (LOPES e TOMAZELLO, 2010).

A espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FT-IR) também tem sido utilizada como uma técnica para a obtenção rápida de informações sobre a estrutura dos constituintes da madeira e as mudanças ocorridas nos mesmos devido a tratamentos químicos. A vantagem desta técnica sobre a análise química convencional recai na possibilidade do uso de amostras de pequenas dimensões e no seu menor tempo de execução. Há também a análise

da madeira por difração de raio-X, método geralmente utilizado para avaliar o grau de cristalinidade em diferentes materiais. Entre os componentes de madeira, apenas a celulose é cristalina, sendo os outros polímeros não-cristalinos. Além destas técnicas, é possível a execução de ensaios termogravimétricos para a caracterização das madeiras. Os três constituintes principais do material, celulose, lignina e hemicelulose, têm atributos típicos com relação à degradação térmica, que se baseia na sua composição polimérica. A natureza tridimensional e a microestrutura da madeira são variáveis que desempenham papéis importantes em termos dos efeitos sobre o seu comportamento de combustão. Assim, os componentes químicos individuais da madeira se comportam de maneira diferente quando isolados e quando intimamente combinados dentro de cada célula da estrutura de madeira (POPESCU *et al.*, 2011).

A crescente disponibilidade de tecnologias de medição, juntamente com a necessidade de compreender a variação da madeira para o seu processamento e transformação em produtos e bens de consumo, tem levado ao aumento do número de estudos investigatórios. Estas pesquisas exploram a variação entre diferentes espécies; dentro da mesma espécie, entre diferentes espécimes; e entre diferentes locais de crescimento de cada árvore. Há, portanto, uma confusa gama de informações mostrando como as propriedades da madeira podem ser variáveis e como isto afeta o processamento da mesma (DOWNES *et al.*, 2009).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Trabalho de campo

Concomitantemente à etapa da fundamentação teórica, foi realizado um levantamento de campo nas indústrias de esquadrias de madeira presentes na cidade de Porto Alegre, RS, visando caracterizar a sua situação produtiva. O objetivo desta etapa foi levantar as espécies de madeira utilizadas, a quantidade, os tipos, o aproveitamento e o tratamento dos resíduos madeireiros gerados no processo fabricação das esquadrias.

Foram realizadas visitas e entrevistas em quatorze empresas. Dentre estas, foi verificado que duas estão passando por uma transição de matéria-prima, madeira para PVC (cloreto de polivinila); uma não possui fábrica, compra os perfis prontos e faz a montagem das peças; duas têm suas fábricas no interior do estado do Rio Grande do Sul; e três, no estado de Santa Catarina. Estas oito empresas foram descartadas para o levantamento de dados pelos motivos expostos, e a obtenção dos dados que compõem o diagnóstico se baseia, portanto, na produção das fábricas de esquadrias de seis empresas.

3.2 Caracterização das madeiras

Dentre as espécies de madeira utilizadas pelas indústrias de esquadrias, para este estudo foram selecionadas sete delas: angelim da mata (*Hymenolobium excelsum*); angelim pedra (*Hymenolobium petraeum*); cedro mara (*Cedrelinga catenaeformis*); garapeira (*Apuleia molaris*); itaúba (*Mezilaurus itauba*); louro amazonense (*Thyrsodium schomburkianum*); e tauari (*Couratari oblongifolia*).

O critério de seleção foi baseado no porcentual de uso das espécies pelas empresas visitadas. As espécies angelim da mata, angelim pedra e itaúba são utilizadas pelas seis empresas analisadas. As espécies garapeira e louro amazonense, por cinco empresas. O tauari, por três empresas. E, por fim, o cedro mara, utilizado por duas das seis empresas analisadas. Ainda que utilizadas por cinco empresas, a grápia e o louro freijó não foram eleitas para o estudo já que estas espécies vêm sendo substituídas pela garapeira e pelo louro amazonense, respectivamente.

Para que a tecnologia proposta na pesquisa, o corte a laser, fosse testada, foi necessário o conhecimento sobre as espécies eleitas para o trabalho. Por meio de ensaios, as matérias-primas selecionadas foram então parcialmente caracterizadas no que tange às

propriedades físicas e químicas inerentes ao material. Dentre os ensaios realizados estão a determinação do teor de umidade, das densidades aparente e básica, e do grau de estabilidade dimensional das madeiras. Foram também realizadas análises de resultados obtidos por espectrometria de energia dispersiva de raios-X (EDS) de cada espécie.

3.2.1 Ensaios para a determinação do teor de umidade

Os ensaios para a determinação do teor de umidade (U) dos rejeitos de cada uma das espécies de madeira selecionadas para o trabalho foram feitos tendo como base a NBR7190/1997: Projeto de estruturas de madeira, da Associação Brasileira de Normas Técnicas. Segundo a norma, o teor de umidade da madeira corresponde à relação entre a massa da água nela contida e a massa da madeira seca. Tal definição é representada na seguinte equação:

$$U(\%) = \frac{m_i - m_s}{m_s} \times 100 \quad (Eq. 1)$$

Onde:

m_i é a massa inicial da madeira, medida em gramas com precisão de 0,01g;

m_s é a massa da madeira seca, medida em gramas com precisão de 0,01g.

Para a realização do ensaio em questão foram utilizados seis corpos de prova de cada espécie com seção transversal retangular medindo 2 x 3 cm e comprimento ao longo das fibras de 5 cm. Foi evitado qualquer tipo de queima em suas faces durante a sua fabricação já que isto poderia provocar a perda de água imediata, prejudicando a determinação da real umidade da amostra.

Com o auxílio de uma balança de precisão e um paquímetro, foram então medidas a massa e as dimensões nos três eixos de todos os corpos de prova. Esta primeira medição da massa é tida como massa inicial. Após este procedimento, os corpos de prova foram levados a uma estufa, com temperatura de $103^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ (Figura 16).

Figura 16 – Corpos de prova dispostos na câmara de secagem.



Da esquerda para a direita: angelim da mata, angelim pedra, cedro mara, garapeira, itaúba, louro amazonense, e tauari.

A cada seis horas todos os corpos de prova eram avaliados, sendo obtidos os valores das massas e das dimensões nos três eixos. Estas medições foram realizadas até o momento em que a variação de massa dos corpos de prova entre duas medidas consecutivas atingiu um valor igual ou menor do que 0,5% em relação à última massa medida. Quando isto acontece, tem-se a massa seca. Os dados adquiridos foram, por fim, inseridos na equação 1 já apresentada, e foi obtido o teor de umidade de cada espécie.

3.2.2 Ensaios para a determinação das densidades aparente e básica

Assim como os ensaios para a determinação do teor de umidade dos rejeitos de cada uma das espécies de madeira, os ensaios para que as densidades aparente e básica fossem determinadas foram feitos de acordo com a NBR7190/1997.

A densidade aparente (ρ_{ap}) é definida como uma massa específica convencional dada pela razão entre a massa e o volume dos corpos de prova com teor de umidade de 12%. De acordo com a NBR7190/1997, quando a umidade relativa do ambiente é menor ou igual a 65%, considera-se que a madeira apresenta 12% de umidade. A equação utilizada para a determinação da densidade aparente é, portanto:

$$\rho_{ap} = \frac{m_{12}}{V_{12}} \quad (Eq. 2)$$

Onde:

m_{12} é a massa da madeira a 12% de umidade, medida em quilogramas;

V_{12} é o volume da madeira a 12% de umidade, medido metros cúbicos.

Para a determinação da densidade aparente de cada espécie, foram utilizados corpos de prova com as mesmas dimensões daqueles utilizados para a determinação do teor de umidade. Os ensaios foram realizados em laboratório climatizado com temperatura controlada de $20^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa do ambiente de aproximadamente 50%. Os corpos de prova permaneceram neste local durante os 15 dias antecedentes aos ensaios, buscando a estabilização de umidade em 12%. As amostras foram pesadas e medidas com o auxílio de uma balança de precisão e um paquímetro, e foi realizada uma média dos valores obtidos pelos seis corpos de prova das espécies estudadas. Com os valores médios da massa e do volume dos corpos de prova a 12% de umidade, foi possível a determinação da densidade aparente de cada espécie por meio da equação 2 apresentada.

Em se tratando da densidade básica (ρ_{bas}), esta é definida como uma massa específica convencional dada pela razão entre a massa seca e o volume saturado. Este conceito é dado pela seguinte equação:

$$\rho_{bas} = \frac{m_s}{V_{sat}} \quad (Eq. 3)$$

Onde:

m_s é a massa seca da madeira, medida em quilogramas;

V_{sat} é o volume da madeira saturada, medido metros cúbicos.

Os valores de massa seca das madeiras estudadas foram obtidos pelo método descrito no item 3.2.1. Para a determinação do volume saturado, conforme a NBR7190/1997, foram utilizados outros seis corpos de prova de cada espécie com seção transversal retangular medindo 2 x 3 cm e comprimento ao longo das fibras de 5 cm. Estes, após tendo sido pesados e medidos, foram colocados em água (Figura 17).

Figura 17 – Corpos de prova colocados em água.



A cada seis horas todos os corpos de prova eram medidos, sendo obtidos os valores das massas e das dimensões nos três eixos. Estas medições foram realizadas até o momento em que a variação de massa dos corpos de prova entre duas medidas consecutivas atingiu um valor constante ou de no máximo 0,5% em relação à última massa medida. Quando este valor é atingido, tem-se a madeira saturada, e conseqüentemente o volume saturado.

De posse dos valores de volume saturado e dos valores de massa seca de cada uma das espécies de madeira estudadas, foi feito o cálculo para a determinação da densidade básica por meio da equação 3 apresentada. Foi necessária a conversão dos valores das massas de grama para quilograma e dos valores de volume, de milímetro cúbico para metro cúbico.

3.2.3 Ensaio para a determinação da estabilidade dimensional

A estabilidade dimensional da madeira caracteriza-se pelas propriedades de retração e inchamento nas três direções do material – longitudinal, radial e tangencial – considerando o comprimento, a largura e a altura dos corpos de prova. Tendo também como base a NBR7190/1997, foram realizados os ensaios para a determinação do grau de estabilidade dimensional das espécies estudadas neste trabalho. Da mesma forma, para este ensaio os corpos de prova utilizados apresentam seção transversal retangular de 2 x 3 cm e comprimento ao longo das fibras de 5 cm.

De acordo com a NBR7190/1997, as deformações específicas de retração (ϵ_r) e de inchamento (ϵ_i) são consideradas como índices de estabilidade dimensional e são determinadas para cada uma das direções preferenciais mencionadas: longitudinal, radial e

tangencial. Os valores dos índices de estabilidade dimensional se dão em função das dimensões da madeira saturada e seca. As equações que representam esta relação são:

$$\varepsilon_{r,L} = \left(\frac{C_{sat} - C_s}{C_{sat}} \right) \times 100 \quad \varepsilon_{r,R} = \left(\frac{L_{sat} - L_s}{L_{sat}} \right) \times 100 \quad \varepsilon_{r,T} = \left(\frac{A_{sat} - A_s}{A_{sat}} \right) \times 100$$

(Eq. 4, 5 e 6)

$$\varepsilon_{i,L} = \left(\frac{C_{sat} - C_s}{C_s} \right) \times 100 \quad \varepsilon_{i,R} = \left(\frac{L_{sat} - L_s}{L_s} \right) \times 100 \quad \varepsilon_{i,T} = \left(\frac{A_{sat} - A_s}{A_s} \right) \times 100$$

(Eq. 7, 8 e 9)

Onde:

$\varepsilon_{r,L}$; $\varepsilon_{r,R}$; $\varepsilon_{r,T}$ são as deformações específicas de retração nas direções longitudinal, radial e tangencial, respectivamente;

$\varepsilon_{i,L}$; $\varepsilon_{i,R}$; $\varepsilon_{i,T}$ são as deformações específicas de inchamento nas direções longitudinal, radial e tangencial, respectivamente;

C_s ; C_{sat} são as medidas de comprimento da madeira seca e saturada, respectivamente;

L_s ; L_{sat} são as medidas de largura da madeira seca e saturada, respectivamente;

A_s ; A_{sat} são as medidas de altura da madeira seca e saturada, respectivamente.

A variação volumétrica, por sua vez é determinada em função dos volumes dos corpos de prova no estado saturado e seco, e é representada pela seguinte equação:

$$\Delta V = \left(\frac{V_{sat} - V_s}{V_s} \right) \times 100 \quad (Eq. 10)$$

Onde:

ΔV corresponde à variação volumétrica;

V_s ; V_{sat} são os volumes da madeira seca e saturada, respectivamente.

De posse das médias dos valores das dimensões e dos volumes dos corpos de prova de cada espécie nos estados saturado e seco, obtidos pelos métodos descritos nos itens 3.2.1 e 3.2.2, foi efetuado o cálculo da estabilidade dimensional por meio das fórmulas apresentadas. Foram determinadas as deformações específicas de retração e inchamento para as três direções, longitudinal, radial e tangencial, e também a variação volumétrica de cada espécie.

3.2.4 Análises de espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (EDS)

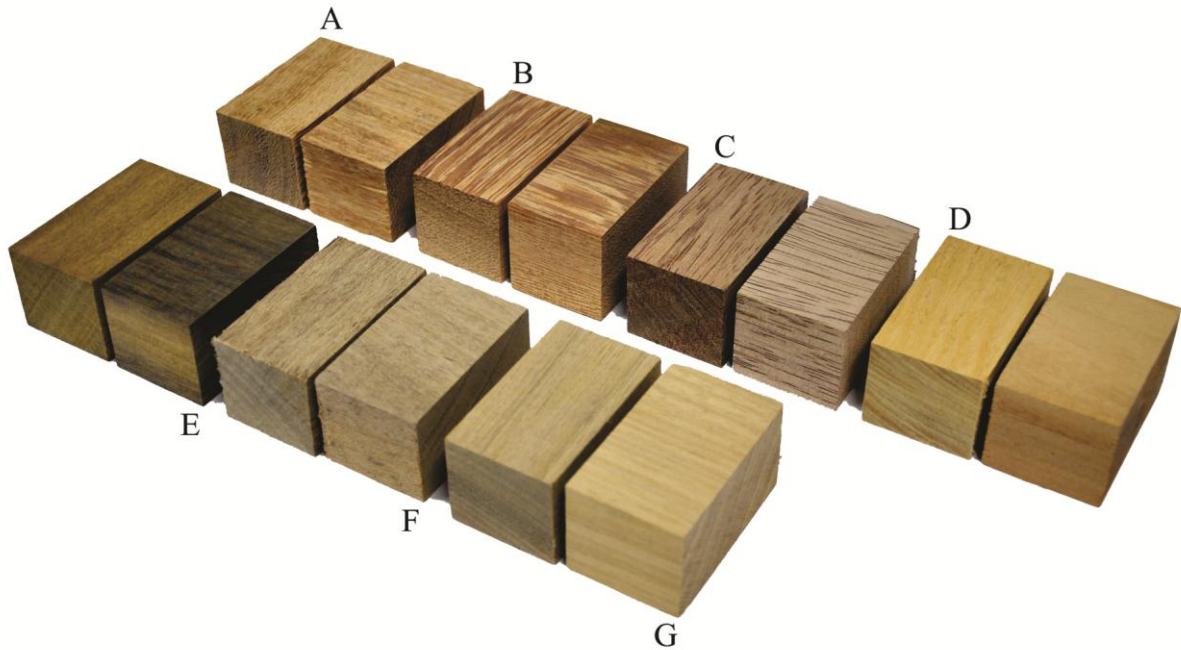
Para a determinação da composição química qualitativa e semi-quantitativa das espécies de madeiras, foram feitas análises de espectrometria de energia dispersiva de raios-X (EDS). Para tanto foi utilizado o equipamento Oxford Instruments® modelo SwiftED3000, acoplado ao equipamento MEV, Hitachi®, modelo TM3000, instalado nas dependências do Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LdSM) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). O aparelho possibilita análises elementares de amostras desde o boro ($Z = 5$) até o urânio ($Z = 92$).

3.3 Obtenção de lâminas a partir dos resíduos madeireiros

Para a realização dos ensaios dos parâmetros de corte a laser, a primeira etapa foi transformar os rejeitos provenientes das indústrias de esquadria de madeira em corpos de prova de dimensões aproximadas. Como já mencionado, a marchetaria se utiliza de lâminas delgadas de madeira com espessuras que variam entre 0,1 e 5 mm. Baseado nisto, para os ensaios iniciais da pesquisa, buscou-se a confecção dos corpos de prova equalizando suas espessuras em 3 mm.

Inicialmente, os rejeitos foram cortados em frações de aproximadamente 60x35x32 mm (CxLxA). Estas peças foram confeccionadas evidenciando as fibras da madeira tanto no sentido longitudinal quanto no sentido transversal (Figura 18).

Figura 18 – Peças de madeira com dimensões aproximadas de 60x35x32 mm.



As peças à esquerda evidenciam as fibras no sentido longitudinal, enquanto aquelas à direita, no sentido transversal. (A) angelim da mata; (B) angelim pedra; (C) cedro mara; (D) garapeira; (E) itaúba; (F) louro amazonense; e (G) tauari.

A partir destas peças, teve início o processo de obtenção de lâminas dos resíduos (Figura 19). Para tanto foi utilizada uma serra circular de bancada, com motor assíncrono trifásico da marca Arno S.A.[®], modelo At48b, potência 0,75CV – 50/60Hz, de 2890 RPM – FS 1, e tensão de 220 volts. A ferramenta de corte utilizada foi uma serra circular de *widea* da marca Indfema[®], modelo 8020.05, com 200 mm de diâmetro externo, 30 mm de diâmetro interno (furo), 2 mm de espessura de corpo, 3 mm de espessura de corte, e 60 dentes do tipo trapezoidal.

Com o auxílio de dois dispositivos tipo “sargento”, foi fixado um gabarito metálico a 3 mm da serra circular. Foram, também, utilizados dois elementos de madeira para ajudar a empurrar as peças na direção da serra, já que estas têm dimensões pequenas e o risco de acidentes pelo contato com a ferramenta de corte é grande. Tais elementos também desempenharam a função de evitar que as peças se movimentassem para cima ou para os lados, o que prejudicaria a eficácia do processo de obtenção de lâminas.

Figura 19 – Processo de transformação das peças de madeira em lâminas de 3 mm.



(A) Serra circular de bancada sendo utilizada para o corte da peça da espécie tauari (fibras no sentido transversal); (B) Peça da espécie itaúba sendo cortada (fibras no sentido transversal); (C) Peça da espécie cedro mara sendo cortada (fibras no sentido transversal); (D) Peça da espécie garapeira sendo cortada (fibras no sentido longitudinal).

Foram cortadas doze peças de cada espécie de madeira, seis com as fibras no sentido longitudinal, e seis com as fibras no sentido transversal. No decorrer do processo, as diferentes espécies, nos dois sentidos das fibras, foram avaliadas comparativamente em relação ao grau de resistência ao corte.

Após o corte de todas as peças foi feita a contagem das lâminas produzidas e verificados os possíveis erros e imperfeições existentes nas mesmas. Além disso, com o auxílio de um paquímetro todas as lâminas produzidas tiveram as suas espessuras medidas.

A partir destes resultados iniciais, foram confeccionadas, além das lâminas de 3 mm, lâminas de 1 mm, 2 mm, 4 mm e 5 mm para a realização dos ensaios dos parâmetros de corte a laser.

3.4 Ensaios para a determinação dos parâmetros de corte a laser

Para os ensaios de parâmetros de corte a laser, foi utilizado o equipamento Automatisa®, modelo Assia (Figura 20A), instalado nas dependências do Centro Tecnológico de Pedras, Gemas e Jóias do Rio Grande do Sul - CTPedras, localizado no município de Soledade.

O equipamento funciona com laser ativo de fonte CO₂, que possibilita gravar e cortar diferentes materiais. Sua potência máxima é de 70 W. Possui dois canhões de laser e dois bocais de corte para uso alternado (Figura 20B). Enquanto um dos bocais faz a localização do desenho na peça, o outro lança o feixe de laser. Juntamente com o feixe, para resfriamento, o equipamento conta com o sopro de um jato de ar na região que está sendo cortada.

O aparelho opera por meio de um sistema *plotter*, onde os cortes são efetuados perpendicularmente ao material de trabalho, permitindo maior regularidade de corte entre o topo e a base das peças. Possui uma mesa de tampo metálico vazado em formato colmeia com elevação motorizada e área de trabalho de 1250 x 600 mm².

Figura 20 – Equipamento Automatisa®, modelo Assia.



(A) Vista geral; (B) Detalhe dos bocais de corte; (C) Computador para manipulação dos desenhos e parâmetros; (D) Janela de ajuste dos parâmetros potência, velocidade e aceleração.

As variáveis passíveis de ajuste neste equipamento (Figura 20 C e D) são a potência (W) do feixe de laser, a aceleração (mm/s²) e as velocidades (mm/s) de movimentação dos bocais de corte, e o fluxo de saída do jato de ar (bar ou lbf/in²).

Os ensaios foram realizados em seis das sete espécies de madeira caracterizadas: angelim da mata (*Hymenolobium excelsum*); cedro mara (*Cedrelinga catenaeformis*); garapeira (*Apuleia molaris*); itaúba (*Mezilaurus itauba*); louro amazonense (*Thyrsodium schomburkianum*); e tauari (*Couratari oblongifolia*). Não foi dada continuidade ao estudo da espécie angelim pedra (*Hymenolobium petraeum*) por esta ter se tornado de difícil acesso e aquisição no decorrer do trabalho.

3.4.1 Ensaio 01 – Traços retos

Para o desenvolvimento da investigação da interação entre o laser e as diferentes espécies de madeira buscando o corte das peças foram utilizados os seguintes parâmetros: potência entre 66,5 W e 70 W (95 e 100%), aceleração de 1.000 mm/s², e pressão do jato de ar para refrigeração de 1 bar. O parâmetro intervalar de potência é função do equipamento utilizado, que ajusta esta variável entre x e y%. Foram testadas as velocidades de 1 a 100 mm/s, variando de 5 em 5 mm/s. A distância focal foi ajustada, adequando a altura da mesa de trabalho de modo a face superior das amostras distassem 3 mm do bocal de corte.

Para os ensaios foram utilizadas lâminas delgadas das seis espécies de madeira, com espessuras de 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm e 5 mm. A fim de verificar qual a velocidade de corte para cada espécie e cada espessura, foi realizado um primeiro ensaio com traços retos.

Para determinar a partir de qual distância a maior velocidade a ser testada seria atingida, e conseqüentemente, determinar a dimensão dos traços retos a serem desenhados, foi utilizada a Equação de Torricelli (desenvolvida para encontrar a velocidade final de um corpo em movimento retilíneo uniformemente variado sem conhecer o intervalo de tempo em que este permaneceu em movimento):

$$V_f^2 = V_0^2 + 2ad \quad (Eq. 11)$$

Onde:

V_f corresponde à velocidade final;

V_0 corresponde à velocidade inicial;

a corresponde à aceleração;

d corresponde à distância percorrida.

Tendo a velocidade final de 100 mm/s, a velocidade inicial de 0 mm/s, e a aceleração de 1.000 mm/s², a distância percorrida encontrada foi de 5 mm. Isto significa que a partir dos 5 mm, a velocidade de 100 mm/s é atingida. Para que as demais velocidades testadas sejam atingidas, as distâncias percorridas são menores do que 5 mm. Assim, os traços retos foram desenhados com 20 mm.

Inicialmente os ensaios foram feitos nas lâminas com espessuras de 5 mm e 4 mm (Figura 22). Em se tratando de um material natural, heterogêneo em suas propriedades, foi realizado um número considerável de ensaios a fim de validar os resultados. Para tanto, foram utilizadas três amostras de aproximadamente 50 x 150 mm², e os testes realizados em quatro porções das mesmas (Figura 21), totalizando doze ensaios das 21 velocidades (1, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95 e 100 mm/s) em cada espécie e espessura.

Os desenhos foram elaborados no *software* AutoCAD® versão 2012, e exportados como arquivos de extensão .dxf – Formato de Desenho de Intercâmbio do inglês *Drawing Exchange Format*, arquivo de intercambio para modelos de CAD – Desenho Auxiliado por Computador, do inglês *Computer Aided Design*.

Figura 21 – Desenho esquemático das porções das amostras e diferentes velocidades para os ensaios de corte com traços retos para lâminas de 4 mm e 5 mm.

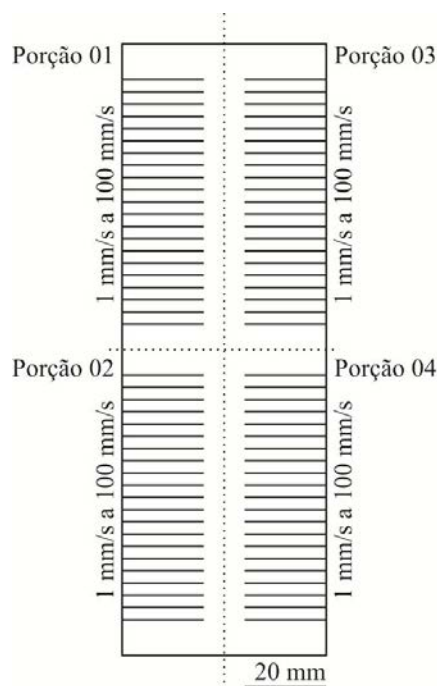
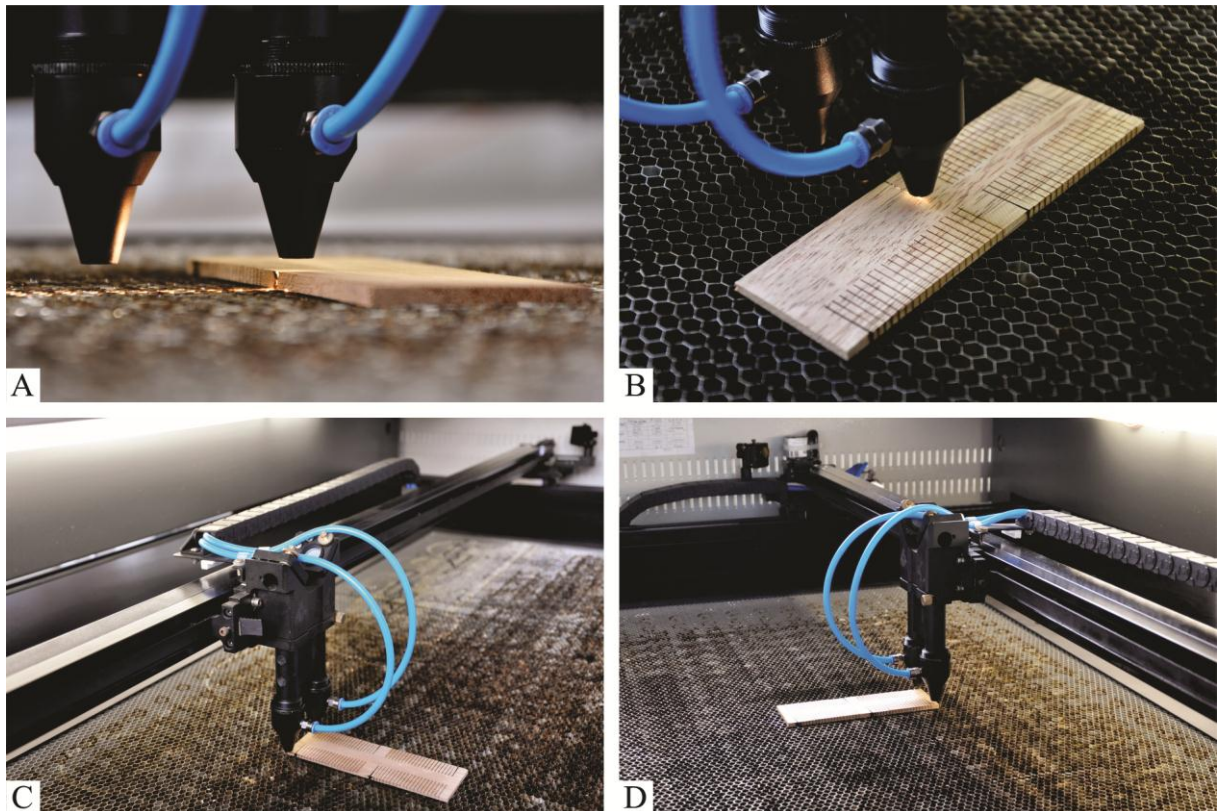


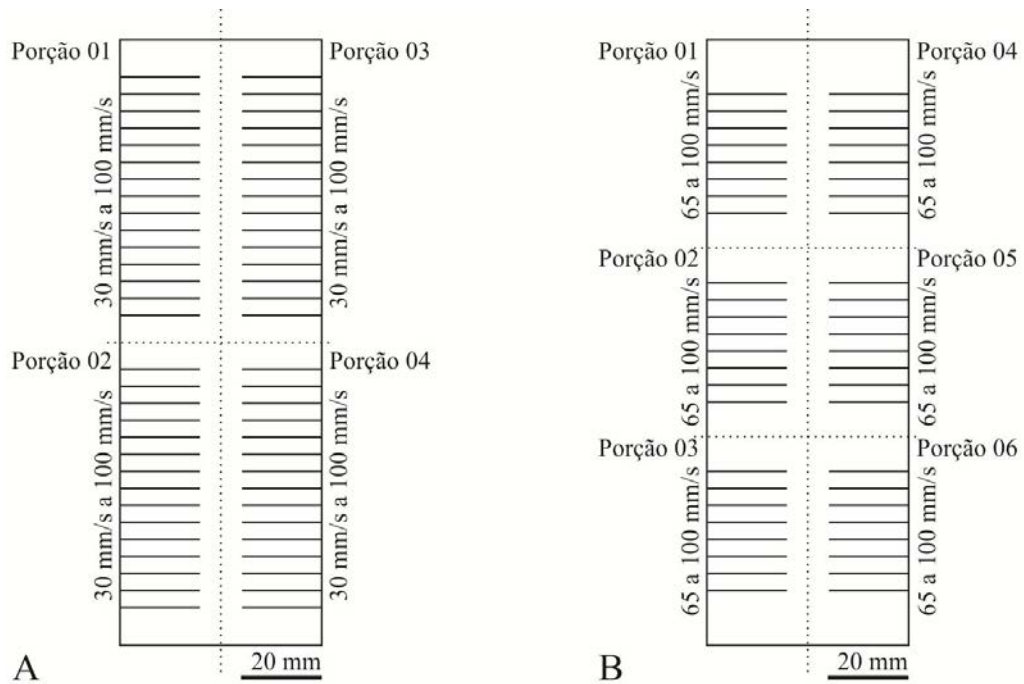
Figura 22 – Processo de corte a laser sendo testado nas lâminas de 5 mm.



Lâmina de tauari sendo cortada a velocidade de 1 mm/s; (B) Lâmina de cedro mara sendo cortada a velocidade de 1 mm/s; (C) Lâmina de tauari com os cortes finalizados; (D) Lâmina de garapeira com os cortes finalizados.

A partir dos resultados encontrados com estes primeiros ensaios, foi diminuída a quantidade de velocidades testadas para as demais espessuras de lâminas. Para as lâminas de 3 mm, as velocidades testadas foram de 30 mm/s a 100 mm/s (Figura 23A); para as de 2 mm, de 65 mm/s a 100 mm/s (Figura 23B); e para as de 1 mm o ensaio com traços retos não foi realizado. Diferente dos demais, para os ensaios nas lâminas de 2 mm foram utilizadas duas amostras, e os testes realizados em seis porções das mesmas, totalizando, também, doze ensaios de cada velocidade e espécie.

Figura 23 - Desenho esquemático das porções das amostras e diferentes velocidades para os ensaios de corte com traços retos para lâminas de 3 mm e 2 mm.



(A) Lâminas de 3 mm; (B) Lâminas de 2 mm.

A avaliação dos parâmetros testados foi feita com o auxílio de microestereoscopia. Para tanto foi utilizado o equipamento Olympus® modelo SZX16, com objetiva de 1x e ocular de 10x que permitem ampliações de 0,7x até 11,5x. O aparelho, presente nas dependências do LdSM/UFRGS, possui uma câmera acoplada para a captura das imagens.

A partir das imagens de microestereoscopia capturadas, foi verificada a eficácia da ação do laser no corte em cada espécie de madeira e espessura de lâmina para as velocidades testadas. Nos locais onde o corte não foi efetuado por completo, ou seja, não houve rompimento da lâmina, foi realizada a medição da profundidade efetiva de corte. Tais medições foram realizadas na extremidade das amostras, parte inicial do corte, e no meio das amostras, parte central do corte, a fim de verificar a ação da variável aceleração no processo de corte a laser, uma vez que é desejado um corte preciso e contínuo das lâminas.

3.4.2 Ensaio 02 – Círculos e Quadrados

De posse dos resultados encontrados a partir do ensaio 01, com traços retos, foram realizados ensaios com círculos e quadrados. Para tanto foram utilizadas amostras de aproximadamente 60 x 35 mm² nas cinco espessuras definidas para o estudo: 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm e 5 mm.

Os parâmetros utilizados para estes ensaios foram: potência entre 66,5 W e 70 W (95 e 100%), aceleração de 1.000 mm/s², e pressão do jato de ar para refrigeração de 1 bar. Para cada espécie de madeira e espessura de lâmina foram utilizadas as velocidades apontadas na Tabela 1. A distância focal foi ajustada, adequando a altura da mesa de trabalho para que a face superior das amostras distassem 3 mm do bocal de corte.

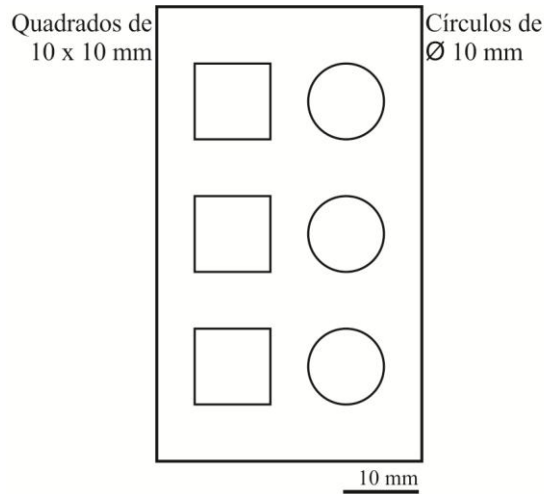
Tabela 1 – Velocidades de corte, medidas em mm/s, utilizadas para cada espécie e espessura.

Espécies	Amostras de 5 mm	Amostras de 4 mm	Amostras de 3 mm	Amostras de 2 mm	Amostras de 1 mm
angelim da mata	15	20	25	70	100
cedro mara	25	40	55	100	100
garapeira	15	25	35	90	100
itaúba	10	20	25	70	100
louro amazonense	5	15	20	70	100
tauari	15	20	20	70	100

O ensaio consistiu no corte de três círculos de 10 mm de diâmetro e três quadrados de seção 10 x 10 mm (Figura 24). Os desenhos foram, da mesma forma, elaborados no *software* AutoCAD® versão 2012, e exportados como arquivos DXF. Para cada espécie de madeira, espessura de lâmina e velocidade de corte encontrada foram realizados ensaios em três amostras, totalizando nove círculos e nove quadrados.

O intuito destes ensaios foi a verificação de quanto material o laser vaporizou após a ação do corte. A partir destes dados foi possível determinar a medida adicional necessária aos desenhos para que o projeto e execução das peças apresentem formatos e dimensões idênticas. Para cada espécie de madeira e espessura de lâmina foram realizadas medições do diâmetro dos círculos e dos eixos X e Y dos quadrados. Estas medições foram realizadas a partir de imagens de microestereoscopia.

Figura 24 – Ensaio com círculos e quadrados para as cinco espessuras de lâmina.



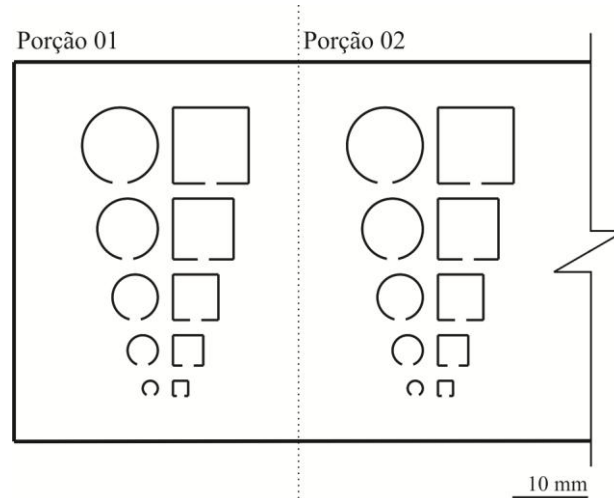
3.4.3 Ensaio 03 - Círculos e Quadrados de dimensões variadas

No terceiro ensaio, foram também utilizadas as formas de círculos e quadrados, porém, as suas dimensões foram variadas (Figura 25). Os círculos foram desenhados com diâmetros de 10 mm, 8 mm, 6 mm, 4 mm e 2 mm. E os quadrados com seções de 10 x 10 mm, 8 x 8 mm, 6 x 6 mm, 4 x 4 mm e 2 x 2 mm. Neste ensaio, as referidas formas não foram fechadas para que, após o corte, as peças permanecessem presas às amostras. Tal medida foi adotada em função do equipamento ser composto por uma mesa de tampo metálico vazado passível de ocasionar a perda das peças por entre os espaços vazios (hexágonos regulares de aresta de 2,5mm).

Para cada espécie de madeira, espessura de lâmina e velocidade de corte foram realizados ensaios em duas porções de duas amostras de aproximadamente 50 x 150 mm², totalizando quatro círculos e quatro quadrados das cinco dimensões determinadas.

Os parâmetros utilizados para estes ensaios foram os mesmos do ensaio 02, com círculos e quadrados, descritos no subitem 3.4.2. Os desenhos foram também desenvolvidos no *software* AutoCAD® versão 2012, e exportados com extensão dxf.

Figura 25 – Ensaio com círculos e quadrados com dimensões variadas para as cinco espessuras de lâmina.



Com o ensaio 03, foi possível verificar se a dimensão do desenho a ser executado na peça influencia a quantidade de material vaporizado pela ação do laser no contorno do desenho. Consequentemente, foi verificada se a medida adicional necessária aos projetos é variável de acordo com as dimensões dos desenhos a serem executados.

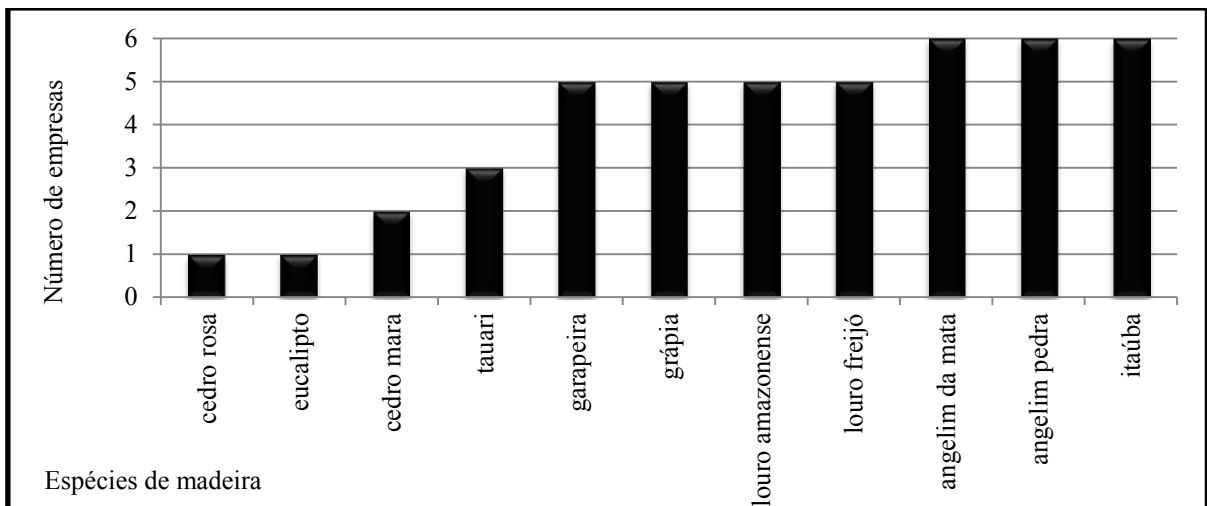
A avaliação deste ensaio foi feita a partir de imagens de microestereoscopia, nas quais foram, igualmente, medidos os diâmetros dos círculos, e os eixos X e Y dos quadrados. Por meio destas imagens de microestereoscopia, com um maior aumento, foi ainda verificada a possível existência de zonas afetadas pelo calor, e conseqüente alteração da coloração das amostras.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Dados coletados em trabalho de campo

Em relação às espécies de madeira, foi constatada a utilização de onze tipos diferentes: angelim da mata (*Hymenolobium excelsum*); angelim pedra (*Hymenolobium petraeum*); cedro mara (*Cedrelinga catenaeformis*); cedro rosa (*Cedrela fissilis*); eucalipto (*Eucalyptus spp*); garapeira (*Apuleia molaris*); grápia (*Apuleia leiocarpa*); itaúba (*Mezilaurus itauba*); louro amazonense (*Thyrsodium schomburkianum*); louro freijó (*Cordia goeldiana*); e tauari (*Couratari oblongifolia*). Verificou-se também que o emprego do louro freijó está reduzido devido ao seu elevado valor comercial. A espécie vem sendo substituída pelo louro amazonense. A grápia, por sua vez, vem sendo trocada pela garapeira. Estas duas substituições se dão em função de similaridades das características visuais entre as espécies citadas. Há ainda de se salientar que nem todas as espécies citadas são utilizadas pelas seis fábricas em questão. Cada uma das espécies é empregada por um número determinado de empresas (Figura 26).

Figura 26 – Gráfico representativo do número de empresas x espécies de madeira utilizadas.



De acordo com as características morfológicas e dimensionais (Figura 27), os resíduos foram classificados em serragem (Figura 27C), decorrente do processamento de serras, (dividida em pó, partículas menores de 0,5 mm, e resíduos com dimensões entre 0,5 e 2,5 mm), cepilho, decorrente do processamento de plainas, (dimensões maiores de 2,5 mm) e

lenha (Figura 27D). Este último se divide em aparas (dimensão transversal variável de acordo com os pranchões e comprimento entre 5 e 20 cm, podendo por vezes ser ainda maior) e refilos (dimensão transversal menor de 1 cm² e comprimento variável).

Figura 27 – Vista geral de uma das fábricas avaliadas e a disposição dos resíduos.

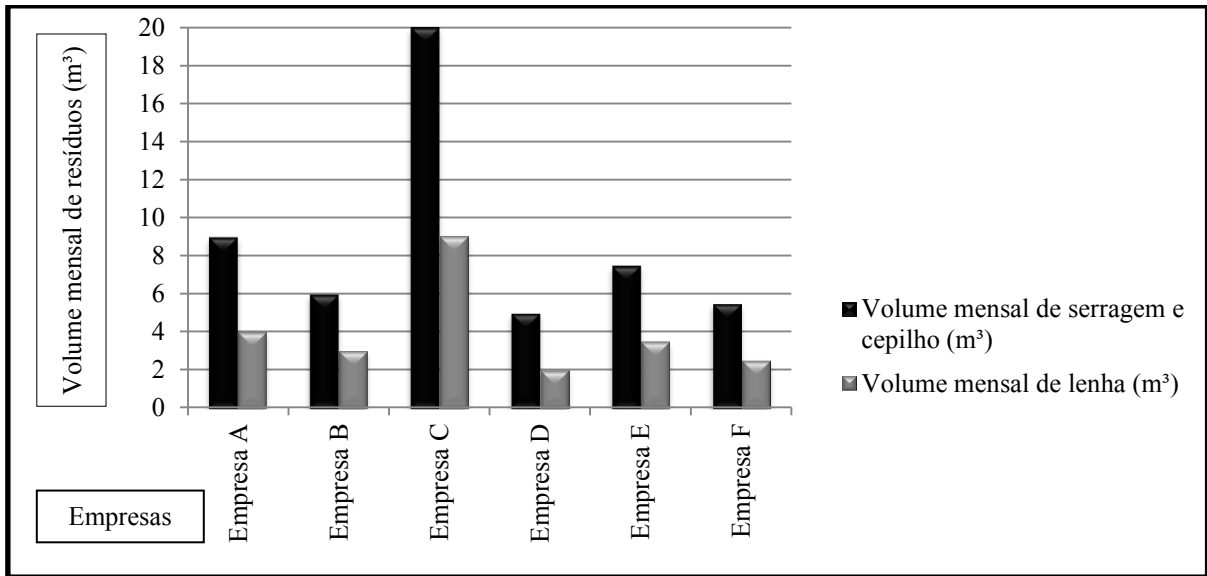


(A) Serragem, aparas, refilos e cepilho; (B) Cepilho, também chamado maravalha; (C) Serragem, englobando pó e partículas maiores; (D) Lenha, englobando aparas e refilos (escalímetro paravisualizar proporções).

Após a classificação dos tipos de resíduos, a pesquisa de campo contou com a quantificação mensal da geração dos mesmos. As quantidades estimadas de resíduos de cada uma das seis empresas, coletadas por meio de entrevista, estão divididas em serragem, cepilho e lenha (Figura 28).

Segundo o levantamento realizado, nenhum tratamento químico é dado à madeira nesta etapa inicial de confecção das esquadrias, facilitando a reutilização dos resíduos gerados. Em relação ao armazenamento dos resíduos, em três das empresas, a serragem e o cepilho ficam em um silo, em duas delas, o material é ensacado e permanece dentro dos pavilhões de trabalho, e em uma delas, fica a céu aberto. A lenha, por sua vez, é armazenada dentro dos pavilhões de trabalho, livre de excessiva umidade e outros possíveis estragos, à exceção de uma das empresas, que dispõe o resíduo classificado como lenha a céu aberto.

Figura 28 – Gráfico do volume (m^3) mensal de resíduo gerado em cada uma das seis empresas estudadas.



Por fim, de acordo com os dados obtidos, viu-se que esses resíduos têm como destino duas áreas principais: a serragem e o cepilho são doados ou vendidos a aviários e estrebarias; enquanto a lenha é doada para a geração de calor através de sua queima em fogões, lareiras e churrasqueiras.

4.2 Caracterização das madeiras

4.2.1 Teor de umidade

A determinação do teor de umidade (U) dos rejeitos de cada uma das espécies foi possível por meio da realização dos ensaios constantes na NBR7190/1997, como descrito anteriormente.

Para a obtenção da massa seca de cada uma das espécies, o número de medições necessárias foi variável, de quatro a seis vezes, como mostra a Tabela 2. Esta tabela apresenta as médias dos valores das massas obtidas pelos seis corpos de prova de cada espécie dispostos em uma câmara de secagem, adquiridos de seis em seis horas.

Tabela 2 – Média das medições das massas dos corpos-de-prova de cada espécie em câmara de secagem.

Espécies	Peso (g) 0h	Peso (g) 6hs	Peso (g) 12hs	Peso (g) 18hs	Peso (g) 24hs	Peso (g) 30hs
angelim da mata	24,56	22,36	22,15	22,10	-	-
angelim pedra	17,64	16,09	15,92	15,87	-	-
cedro mara	17,41	15,95	15,75	15,69	-	-
garapeira	26,57	24,71	24,21	24,02	23,92	-
itaúba	24,09	22,73	22,27	22,04	21,91	21,83
louro amazonense	24,89	22,49	22,03	21,88	21,81	-
tauari	24,42	22,25	22,00	21,92	-	-

Tendo os valores da massa inicial, primeira medição, e da massa seca, última medição, foi possível a determinação do teor de umidade de cada uma das espécies. Estes valores estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Teor de umidade U(%) de cada espécie.

Espécies	Massa inicial (g)	Massa seca (g)	Umidade (%)
angelim da mata	24,56	22,10	11,09%
angelim pedra	17,64	15,87	11,15%
cedro mara	17,41	15,69	10,96%
garapeira	26,57	23,92	11,07%
itaúba	24,09	21,83	10,34%
louro amazonense	24,89	21,81	14,10%
tauari	24,42	21,92	11,39%

A espécie itaúba foi a que apresentou teor de umidade mais baixo, sendo 10,34%. As espécies cedro mara, garapeira, angelim da mata e angelim pedra apresentaram teor de umidade similar, variando entre 10,96% e 11,15%. Tauari apresentou teor de umidade de 11,39%. E a espécie louro amazonense foi a que apresentou teor de umidade mais elevado, sendo 14,10%.

4.2.2 Densidades aparente e básica

Os valores das densidades aparente (ρ_{ap}) e básica (ρ_{bas}) dos rejeitos de cada espécie foram obtidos por meio da realização dos ensaios constantes na NBR7190/1997.

A densidade aparente foi determinada a partir da medição dimensional dos corpos de prova. A Tabela 4 apresenta a média das dimensões em mm nos três eixos e a média do volume em mm³ de cada espécie com umidade a 12%.

Tabela 4 – Média das dimensões e volume dos corpos de prova de cada espécie com umidade a 12%.

Espécies	Comprimento (mm) umidade 12%	Largura (mm) umidade 12%	Altura (mm) umidade 12%	Volume (mm³) umidade 12%
angelim da mata	50,82	31,31	19,95	31738,98
angelim pedra	50,05	29,97	20,15	30228,21
cedro mara	50,66	31,22	20,28	32074,65
garapeira	48,51	31,60	20,22	30998,23
itaúba	48,73	31,14	20,40	30958,83
louro amazonense	50,92	30,59	19,94	31056,14
tauari	50,61	30,14	20,83	31772,19

Além dos valores de volume apresentados na Tabela 4, no cálculo da densidade aparente das espécies, foram utilizados os valores da mesma massa inicial constantes na Tabela 3. Isto se deu em função de os corpos de prova estarem em um ambiente com umidade relativa do ar menor do que 65%, e portanto, a madeira apresentava 12% de umidade. Os valores das massas foram convertidos de grama para quilograma e os de volume, de milímetro cúbico para metro cúbico. Tais valores, assim como a densidade aparente de cada uma das espécies estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Densidade aparente ρ_{ap} de cada espécie.

Espécies	Massa (g) umidade 12%	Volume (mm³) umidade 12%	Densidade aparente (kg/m³)
angelim da mata	24,56	31738,98	773,5
angelim pedra	17,64	30228,21	583,6
cedro mara	17,41	32074,65	542,9
garapeira	26,57	30998,23	857,3
itaúba	24,09	30958,83	777,9
louro amazonense	24,89	31056,14	801,3
tauari	24,42	31772,19	768,7

A espécie cedro mara foi a que apresentou densidade aparente mais baixa (542,9 kg/m³), seguida do angelim pedra (583,6 kg/m³). As espécies tauari, angelim da mata e itaúba apresentaram valores de densidade aparente similares, variando entre 768,7 e 777,9 kg/m³. As espécies louro amazonense e garapeira foram as que apresentaram valores mais elevados, 801,3 e 857,3 kg/m³, respectivamente.

A densidade básica foi determinada a partir do valor da massa seca e do volume saturado. Os valores de massa seca de cada uma das espécies constam na Tabela 3. Para a obtenção do volume saturado, o número de medições necessárias para cada espécie foi

variável, de oito a treze vezes, como mostra a Tabela 6. Esta tabela apresenta as médias dos valores das massas obtidos pelos seis corpos de prova de cada espécie submersos em água, adquiridos de seis em seis horas.

Tabela 6 – Média das medições das massas dos corpos-de-prova de cada espécie submersos em água.

Espécies	Peso (g) 0h	Peso (g) 6hs	Peso (g) 12hs	Peso (g) 18hs	Peso (g) 24h	Peso (g) 30hs	
angelim da mata	24,23	26,24	27,37	27,81	28,18	28,51	
angelim pedra	18,39	20,21	20,81	21,12	21,36	21,62	
cedro mara	17,74	19,28	19,97	20,37	20,62	20,89	
garapeira	26,55	27,88	28,47	29,89	29,18	29,43	
itaúba	24,65	25,42	25,80	26,02	26,17	26,34	
louro amazonense	21,37	23,07	23,96	24,52	24,93	25,27	
tauari	24,33	26,25	27,32	28,04	28,54	29,03	
Espécies	Peso (g) 36hs	Peso (g) 42hs	Peso (g) 48h	Peso (g) 54hs	Peso (g) 60hs	Peso (g) 66hs	Peso (g) 72hs
angelim da mata	28,91	29,23	29,61	29,87	30,15	30,27	-
angelim pedra	21,89	22,16	22,47	22,90	22,97	23,07	-
cedro mara	21,18	21,52	21,87	21,95	-	-	-
garapeira	29,71	29,99	30,22	30,37	-	-	-
itaúba	26,50	26,62	-	-	-	-	-
louro amazonense	25,59	25,93	26,28	26,50	26,62	-	-
tauari	29,71	30,49	31,15	31,57	31,83	32,08	32,23

Na Tabela 7 estão a média dos valores das dimensões em mm nos três eixos e a média do volume em mm³ dos corpos de prova de cada espécie saturados.

Tabela 7 – Média das dimensões e volume dos corpos de prova de cada espécie saturados.

Espécies	Comprimento (mm) saturado	Largura (mm) saturado	Altura (mm) saturado	Volume saturado (mm³)
angelim da mata	50,76	32,74	20,63	34286,25
angelim pedra	49,96	30,54	22,28	34003,06
cedro mara	50,72	31,31	21,02	33373,53
garapeira	48,88	32,07	20,63	32340,82
itaúba	48,82	31,61	20,80	32098,14
louro amazonense	50,93	31,09	20,45	32376,04
tauari	50,80	31,22	21,80	34564,31

Os valores de massa seca (Tabela 3) foram convertidos de grama para quilograma e os de volume saturado (Tabela 7), de milímetro cúbico para metro cúbico. Tais valores, assim com a densidade básica de cada uma das espécies estão na Tabela 8.

Tabela 8 – Densidade básica ρ_{bas} de cada espécie.

Espécies	Massa seca (g)	Volume saturado (mm³)	Densidade básica (kg/m³)
angelim da mata	22,10	34286,25	644,8
angelim pedra	15,87	34003,06	472,6
cedro mara	15,69	33373,53	470,2
garapeira	23,92	32340,82	739,9
itaúba	21,83	32098,14	680,2
louro amazonense	21,81	32376,04	673,8
tauari	21,92	34564,31	634,1

Similar aos resultados de densidade aparente, a espécie cedro mara foi a que apresentou densidade básica mais baixa (470,2 kg/m³), seguida do angelim pedra (472,6 kg/m³). As espécies tauari, angelim da mata, louro amazonense e itaúba apresentaram valores de densidade básica parecidos, variando entre 634,1 e 680,2 kg/m³. A espécie garapeira foi a que apresentou valor mais elevado, sendo 739,9 kg/m³.

4.2.3 Estabilidade dimensional

A determinação das deformações específicas de retração (ϵ_r) e de inchamento (ϵ_i) para cada uma das direções e a variação volumétrica (ΔV) dos rejeitos de cada espécie foi possível por meio da realização dos ensaios constantes na NBR7190/1997.

As médias dos valores das dimensões e dos volumes dos corpos de prova de cada espécie no estado saturado constam na Tabela 7. A Tabela 9 apresenta a média dos valores das dimensões em mm nos três eixos e a média do volume em mm³ dos corpos de prova de cada espécie no estado seco.

Tabela 9 – Média das dimensões e volume dos corpos de prova de cada espécie secos.

Espécies	Comprimento (mm) seco	Largura (mm) seco	Altura (mm) seco	Volume (mm³) seco
angelim da mata	50,63	30,80	19,21	29962,27
angelim pedra	49,74	29,07	19,79	28613,92
cedro mara	50,48	30,67	19,83	30694,84
garapeira	48,32	30,96	19,48	29135,52
itaúba	48,60	30,65	19,99	29783,00
louro amazonense	50,82	29,72	18,99	28674,06
tauari	50,60	29,20	20,32	30017,44

A partir das médias dos valores das dimensões e dos volumes dos corpos de prova de cada espécie nos estados saturado e seco, foi efetuado o cálculo das deformações específicas de retração e inchamento para as três direções, e também o cálculo da variação volumétrica. Estes valores estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Estabilidade dimensional de cada espécie.

Espécies	Retração ϵ_r (%) L	Retração ϵ_r (%) R	Retração ϵ_r (%) T	Inchamento ϵ_i (%) L	Inchamento ϵ_i (%) R	Inchamento ϵ_i (%) T	Varição volumétrica ΔV (%)
angelim da mata	0,26%	5,93%	6,88%	0,26%	6,30%	7,39%	14,43%
angelim pedra	0,44%	4,81%	11,18%	0,44%	5,06%	12,58%	18,83%
cedro mara	0,47%	2,04%	5,66%	0,48%	2,09%	6,00%	8,73%
garapeira	1,15%	3,46%	5,57%	1,16%	3,59%	5,90%	11,00%
itaúba	0,45%	3,04%	3,89%	0,45%	3,13%	4,05%	7,77%
louro amazonense	0,22%	4,41%	7,14%	0,22%	4,61%	7,69%	12,91%
tauari	0,39%	6,47%	6,79%	0,40%	6,92%	7,28%	15,15%

4.2.4 Microestrutura e química da madeira

Por meio de espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (EDS), foi possível a verificação da composição química qualitativa e semi-quantitativa de amostras das sete espécies de madeira em estudo. Para cada espécie, foi feita uma imagem de microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície da amostra evidenciando a área analisada, e extraídos dois espectros de áreas que se mostraram distintas (Figura 29 à Figura 35).

Figura 29 – Angelim da mata: Imagem de MEV da superfície da amostra e espectros de EDS das áreas analisadas.

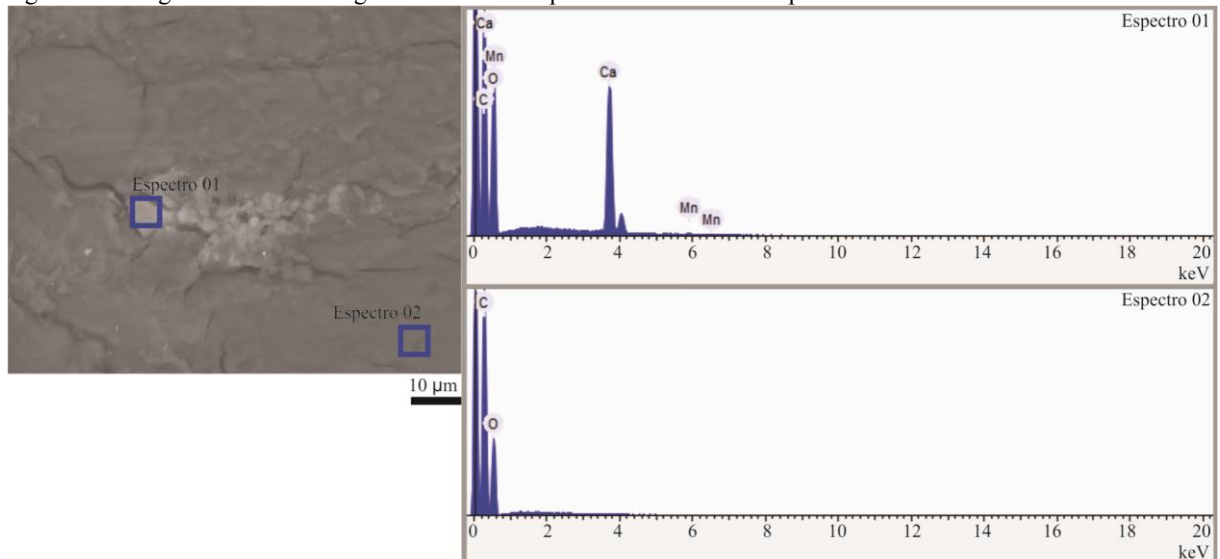


Figura 30 – Angelim pedra: Imagem de MEV da superfície da amostra e espectros de EDS das áreas analisadas.

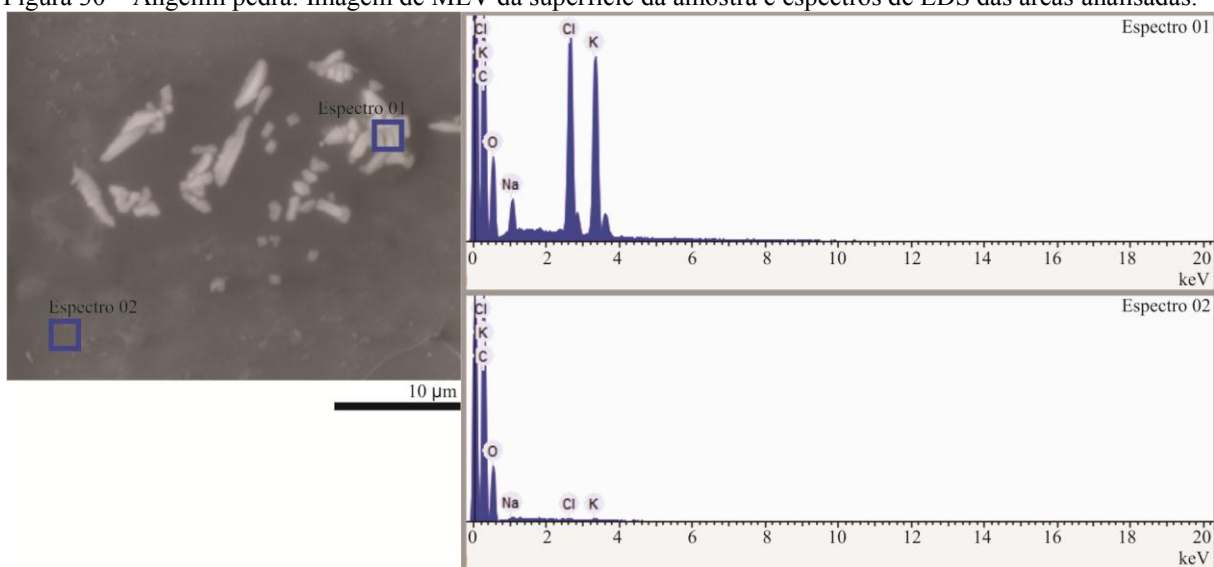


Figura 31 – Cedro mara: Imagem de MEV da superfície da amostra e espectros de EDS das áreas analisadas.

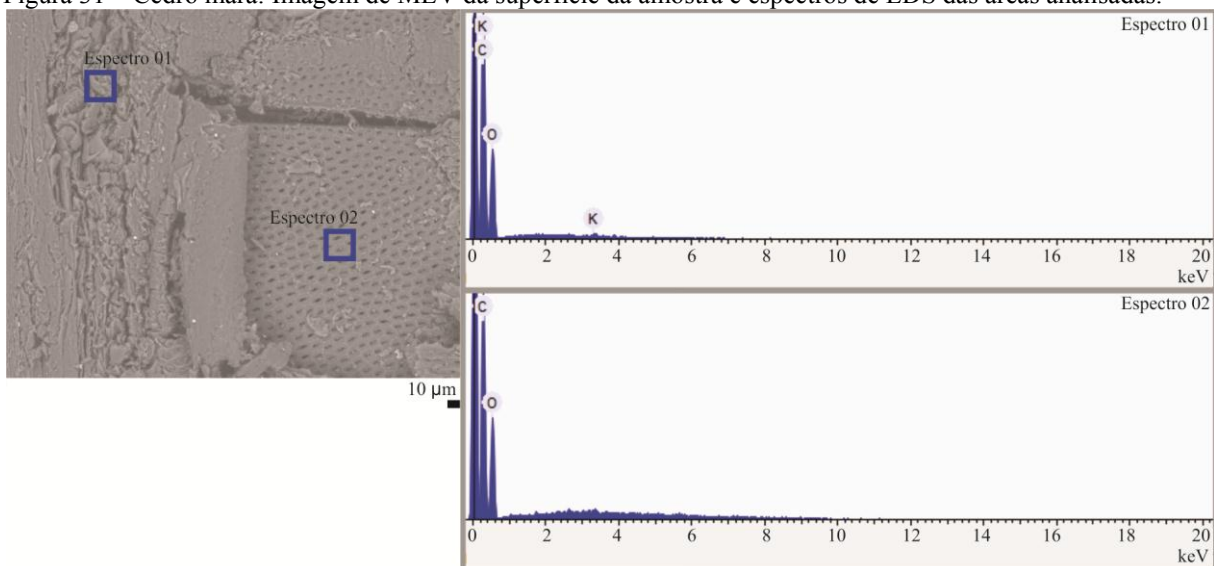


Figura 32 – Garapeira: Imagem de MEV da superfície da amostra e espectros de EDS das áreas analisadas.

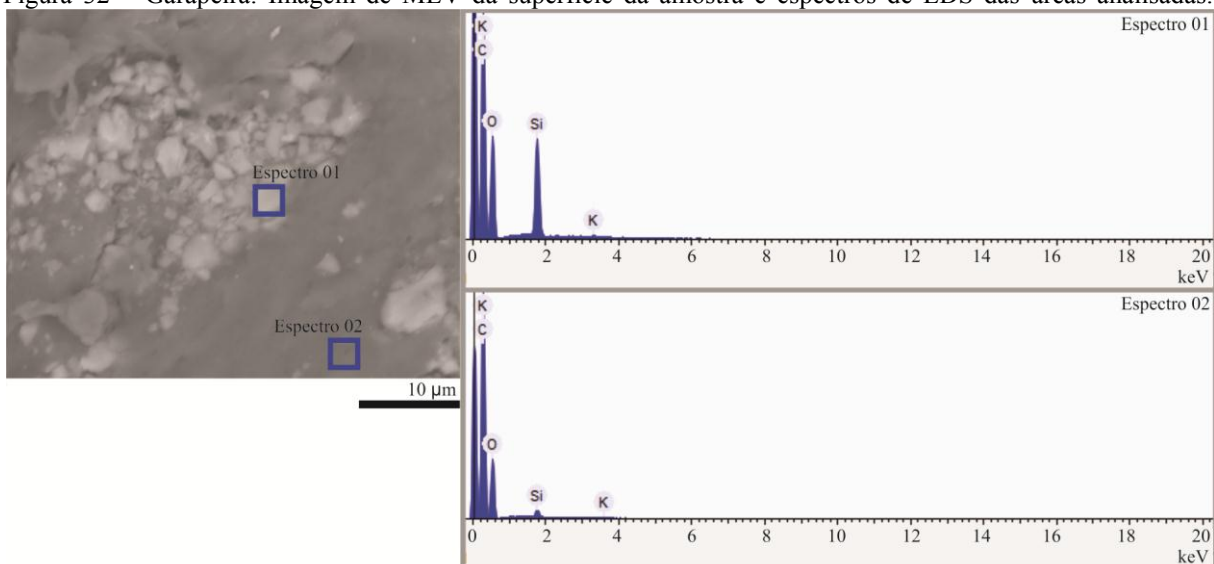


Figura 33 – Itaúba: Imagem de MEV da superfície da amostra e espectros de EDS das áreas analisadas.

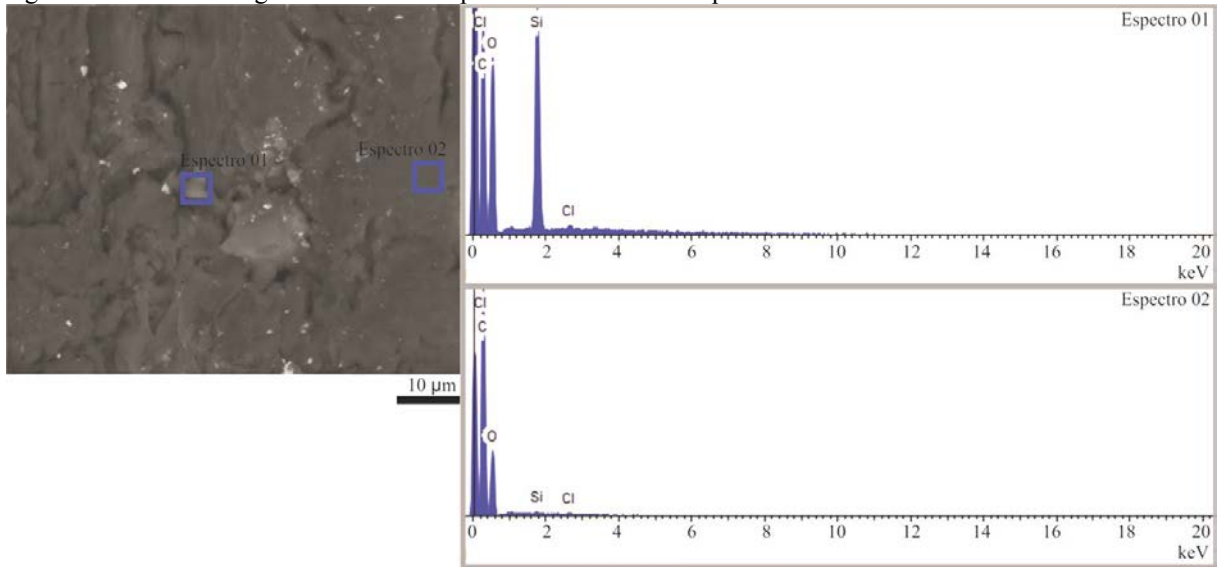


Figura 34 – Louro amazonense: Imagem de MEV da superfície da amostra e espectros de EDS das áreas analisadas.

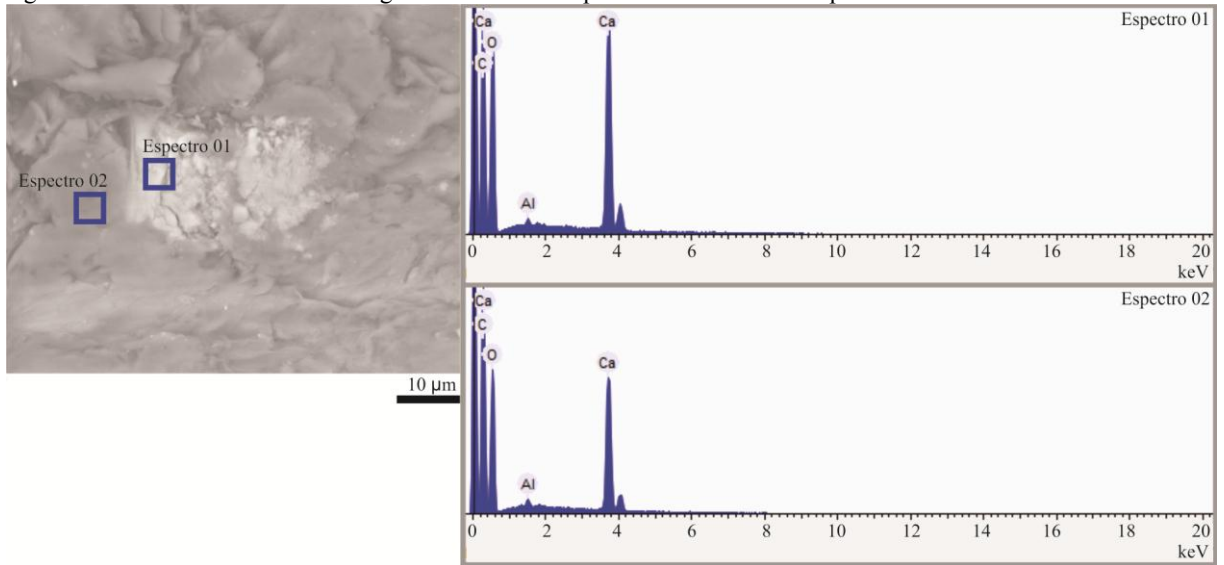
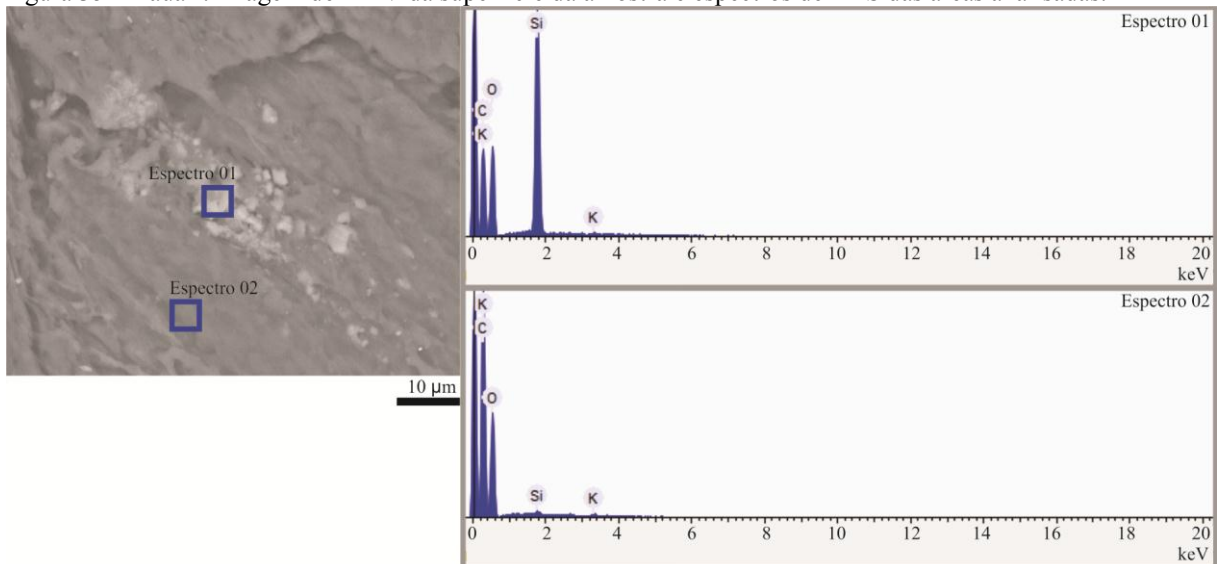


Figura 35 – Tauari: Imagem de MEV da superfície da amostra e espectros de EDS das áreas analisadas.



Os espectros das amostras das espécies de madeira em análise revelam a existência de constituintes inorgânicos em sua totalidade. Na espécie angelim da mata foi identificada a presença de cálcio (Ca) e manganês (Mn); na espécie angelim pedra, de sódio (Na), cloro (Cl) e potássio (K); na espécie cedro mara, de potássio (K); na espécie garapeira, de silício (Si) e potássio (K); na espécie itaúba, de silício (Si) e cloro (Cl); na espécie louro amazonense, de alumínio (Al) e cálcio (Ca); e na espécie tauari, de silício (Si) e potássio (K).

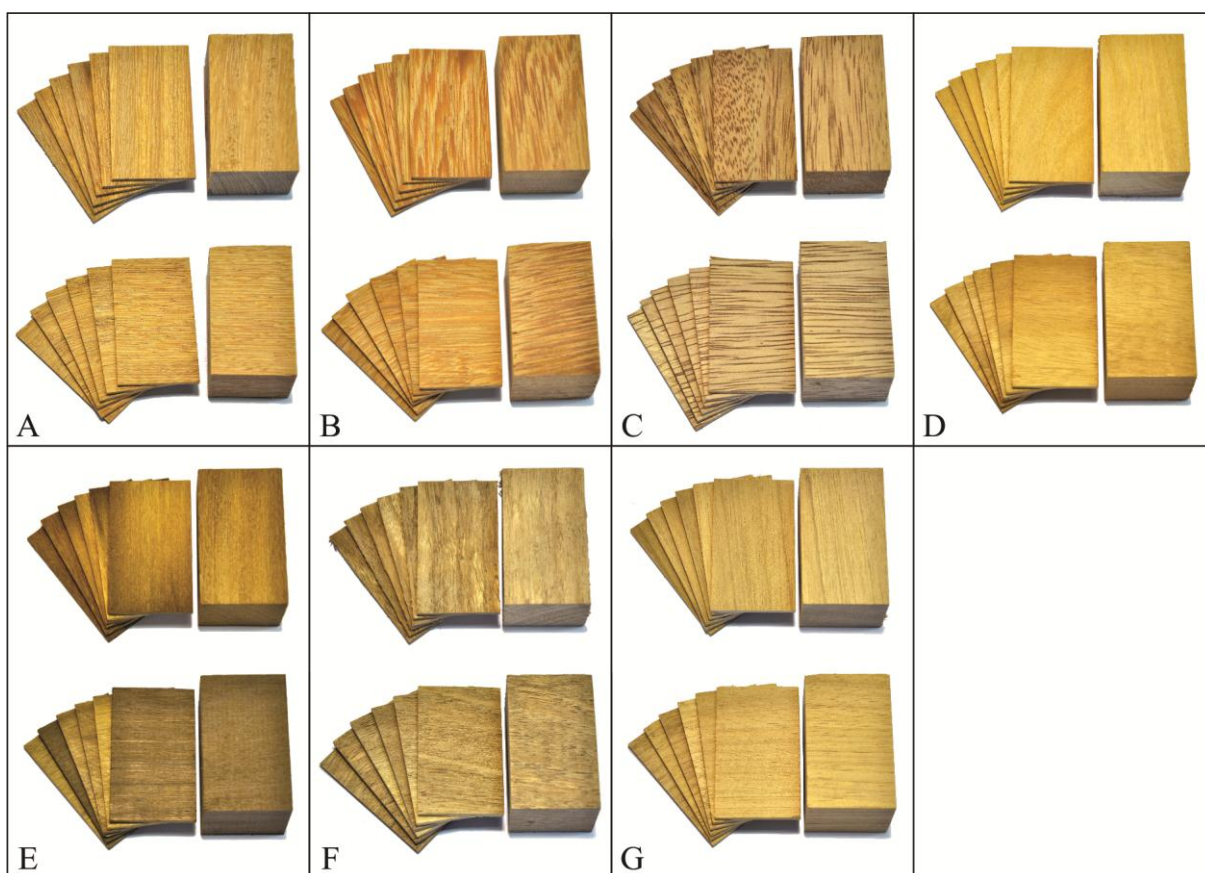
A madeira é composta principalmente por carbono e oxigênio. E, como visto no referencial teórico, seus componentes inorgânicos mais abundantes são cálcio, potássio, nitrogênio, fósforo e magnésio, podendo ainda ser encontrados sódio, ferro, silício, manganês, cobre e zinco. Dentre os constituintes inorgânicos identificados nas amostras analisadas, somente cloro e alumínio não aparecem nesta listagem, sendo possivelmente resquícios da lixa utilizada na confecção das mesmas.

4.3 Lâminas de madeira

No decorrer do processo de transformação dos rejeitos em lâminas de 3mm, as diferentes espécies, nos dois sentidos das fibras, foram avaliadas comparativamente em relação ao grau de resistência ao corte. Foi constatado que as peças com as fibras no sentido transversal, em sua totalidade de espécies, apresentam maior resistência ao corte, dificultando o processo e acarretando um acabamento de menor qualidade nas lâminas. Foi percebido ainda que na espécie angelim da mata, na maioria das vezes, quando a ferramenta de corte encontra os materiais inorgânicos existentes na sua composição, a peça rompe e a lâmina se racha. A espécie itaúba de coloração ora acinzentada, ora amarelada, possui diferenças nestas partes em relação ao grau de resistência ao corte. As partes acinzentadas apresentaram maior grau de resistência do que as amareladas. A espécie garapeira possui a mesma característica, suas partes em tons de marrom amarelado apresentaram maior grau de resistência ao corte do que as partes mais amareladas.

A Figura 36 mostra as lâminas de madeira de cada espécie, com suas fibras nos dois sentidos, geradas a partir das peças maiores, com dimensões de aproximadamente 60x35x32 mm (CxLxA).

Figura 36 – Lâminas de 3 mm confeccionadas a partir de peças de madeira de aproximadamente 60x35x32 mm.



Acima peças com as fibras no sentido longitudinal e abaixo peças com as fibras no sentido transversal.
 (A) angelim da mata; (B) angelim pedra; (C) cedro mara; (D) garapeira;
 (E) itaúba; (F) louro amazonense; e (G) tauari.

Verificou-se ainda que as lâminas tiveram variação dimensional na sua espessura, tanto na direção da largura das peças, quanto do comprimento delas. Esta variação ocorreu de maneira distinta em relação às diferentes espécies e aos dois sentidos das fibras de cada espécie, transversal e longitudinal. Na Tabela 11, a média destas variações para cada espécie estudada.

Tabela 11 – Média da variação dimensional das espessuras das lâminas de cada espécie após o corte.

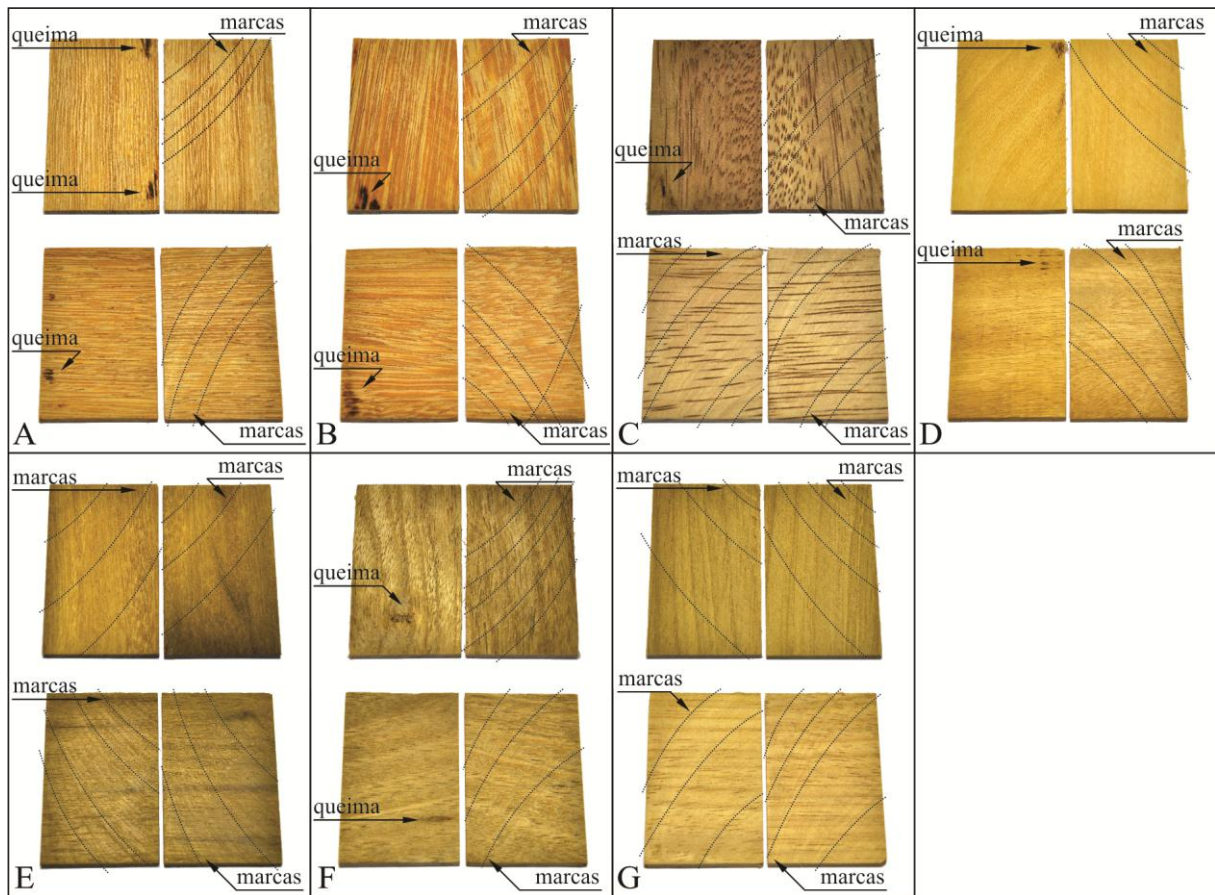
Espécies	Direção de comprimento das lâminas	Direção de largura das lâminas	Direção de comprimento das lâminas	Direção de largura das lâminas
	Sentido longitudinal das fibras	Sentido longitudinal das fibras	Sentido transversal das fibras	Sentido transversal das fibras
angelim da mata	0,15 mm	0,20 mm	0,15 mm	0,20 mm
angelim pedra	0,15 mm	0,20 mm	0,15 mm	0,20 mm
cedro mara	0,10 mm	0,20 mm	0,15 mm	0,20 mm
garapeira	0,20 mm	0,25 mm	0,20 mm	0,25 mm
itaúba	0,20 mm	0,25 mm	0,20 mm	0,25 mm
louro amazonense	0,35 mm	0,35 mm	0,35 mm	0,35 mm
tauari	0,05 mm	0,15 mm	0,10 mm	0,20 mm

A variação dimensional pode ter acontecido por se tratar de um processo parcialmente manual e, portanto a força aplicada para empurrar a peça contra a ferramenta de corte não é uniforme ou constante. Além disso, a força aplicada no momento inicial de contato da peça com a serra é maior do que aquela aplicada no momento final, de saída da peça. Outro fator que pode ter levado a esta variação é a possibilidade de que o gabarito utilizado não estivesse perfeitamente retificado.

Além da variação dimensional nas espessuras das lâminas, outras duas possibilidades de defeitos foram percebidas: a eventual queima de partes das lâminas e a marca ocasionalmente gerada pelo movimento da ferramenta de corte (Figura 37). Em relação a estas marcas, há duas maneiras de se apresentarem. A primeira delas é uma marcação superficial, na forma de leves riscos, e a segunda é uma marcação mais profunda, acarretando uma diferença de nivelamento na superfície da lâmina. Foi constatado que dependendo da espécie de madeira, e do sentido das fibras das lâminas produzidas, tais defeitos ocorreram com maior ou menor frequência.

A quantidade destes defeitos foi calculada para cada espécie, e nos dois sentidos das fibras de cada uma delas. A Tabela 12 mostra, para cada espécie, o somatório total das lâminas produzidas, a quantidade de lâminas com partes queimadas e o número de lâminas com diferença de nivelamento na sua superfície devido ao movimento da serra. No cálculo foram separadas as lâminas com as fibras no sentido longitudinal daquelas no sentido transversal.

Figura 37 – Ilustração dos possíveis defeitos de queima de partes das lâminas e das marcas geradas pelo movimento da ferramenta de corte.



Acima peças com as fibras no sentido longitudinal e abaixo peças com as fibras no sentido transversal.
 (A) angelim da mata; (B) angelim pedra; (C) cedro mara; (D) garapeira; (E) itaúba; (F) louro amazonense;
 e (G) tauari.

Tabela 12 – Quantificação de lâminas produzidas.

Espécies	Total de lâminas Sentido longitudinal	Lâminas Queimadas Sentido longitudinal	Lâminas marcadas Sentido longitudinal	Total de lâminas Sentido transversal	Lâminas Queimadas Sentido transversal	Lâminas marcadas Sentido transversal
angelim da mata	28	12	6	30	2	7
angelim pedra	30	10	7	30	3	6
cedro mara	25	4	6	26	0	6
garapeira	27	2	7	25	2	11
itaúba	27	0	6	24	0	11
louro amazonense	25	5	8	26	3	8
tauari	28	2	5	24	3	11

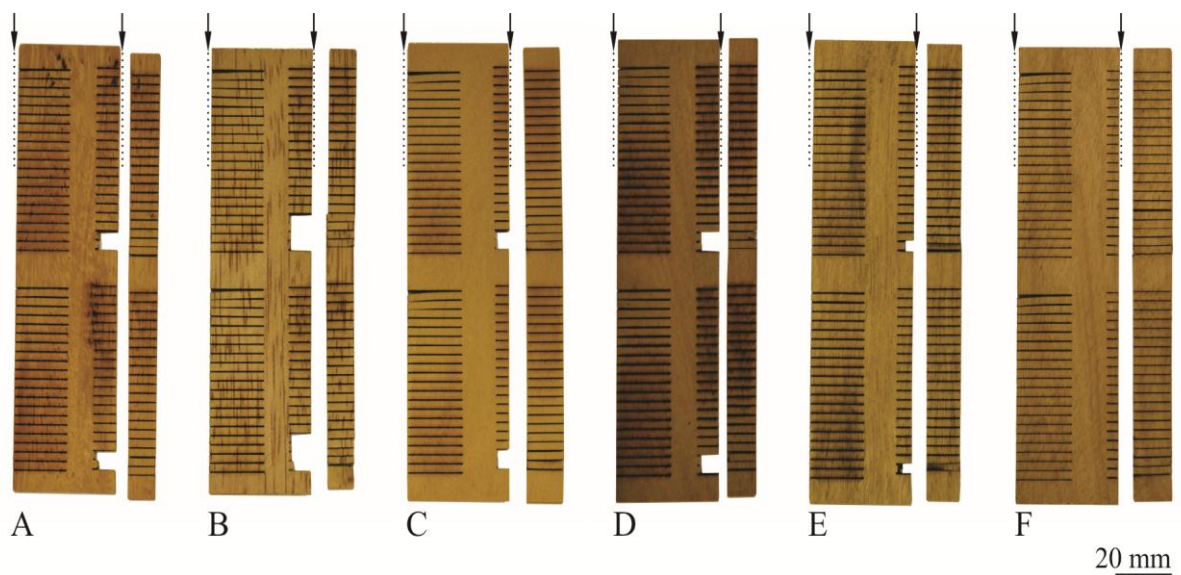
As espécies angelim da mata e angelim pedra foram as que apresentaram um maior número de lâminas com porções queimadas. Foi verificado ainda que todas as espécies apresentaram marcas superficiais produzidas pelo movimento da serra. As espécies garapeira, itaúba, louro amazonense e tauari, nas lâminas com as fibras no sentido transversal, apresentaram marcas mais evidentes. Percebeu-se também a tendência a empenamento nas lâminas com as fibras no sentido transversal, principalmente nas espécies angelim da mata, angelim pedra e cedro mara.

4.4 Corte a laser

4.4.1 Ensaio 01 – Traços retos

Para a avaliação dos resultados dos ensaios do corte a laser com traços retos foi utilizada a microestereoscopia. A partir das imagens obtidas, foi verificada qual a maior velocidade de ação do laser que ocasiona o rompimento completo das lâminas. Para cada espécie de madeira e espessura de lâmina foi verificada uma determinada velocidade. Nos locais onde o corte não foi efetuado por completo, foi realizada a medição da profundidade efetiva de corte.

Figura 38 – Amostras de 5 mm após ensaio com traços retos variando o parâmetro velocidade.

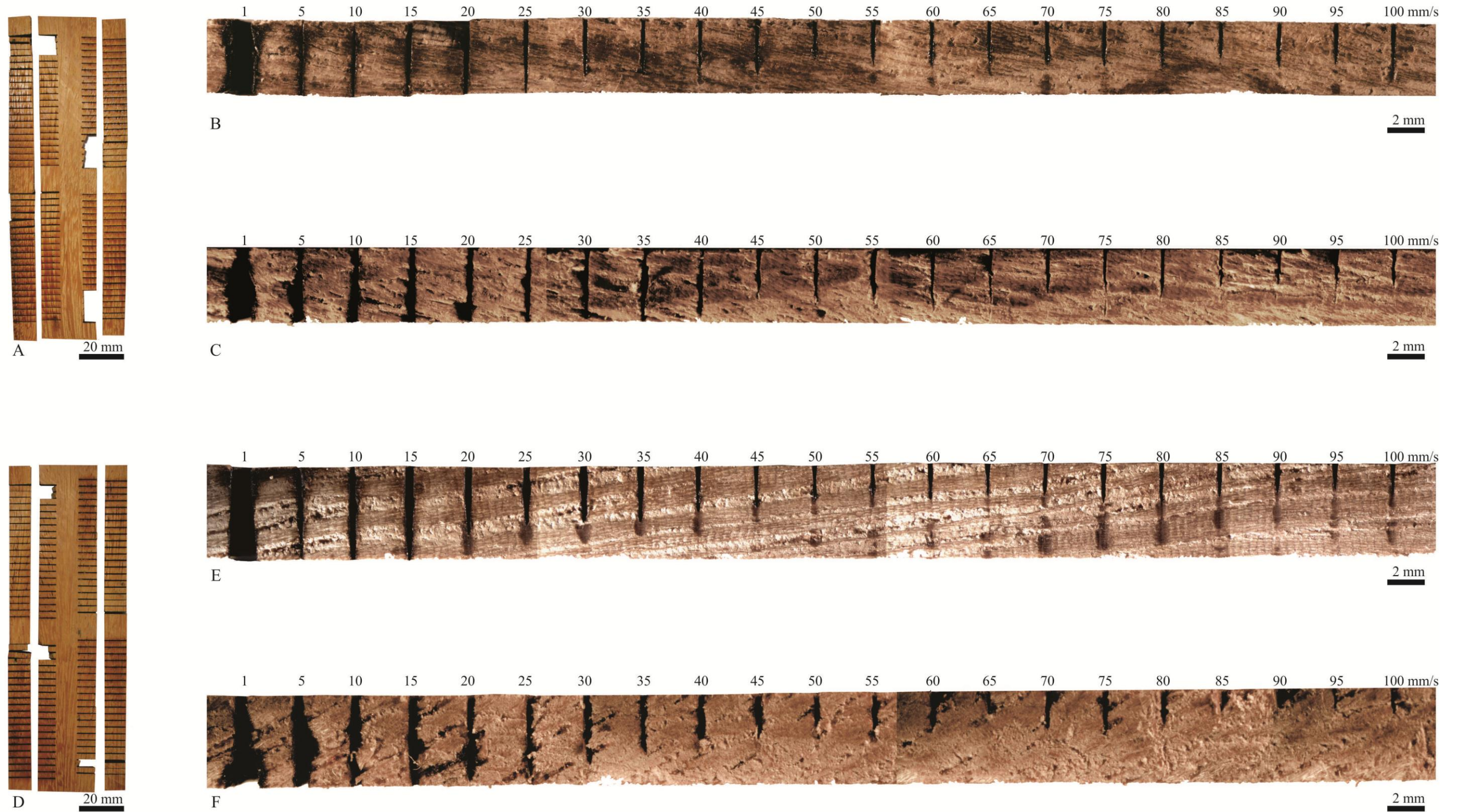


Lado esquerdo apontando a medição na extremidade das amostras e lado direito, no meio das amostras.
 (A) angelim da mata; (B) cedro mara; (C) garapeira; (D) itaúba; (E) louro amazonense; e (F) tauari.

As imagens de microestereoscopia foram capturadas na extremidade das amostras, parte inicial do corte, e no meio das amostras, parte central do corte (Figura 38), a fim de verificar a ação da variável aceleração no processo. No momento do corte das amostras para a análise do resultado da interação do laser com o material na parte central, nos locais onde o corte foi completo, por vezes, houve o rompimento da amostra. Os trechos danificados pelo corte mecânico não influenciaram a análise uma vez que a mediação da profundidade foi realizada somente nos locais onde o corte da lâmina não foi completo.

Inicialmente foram feitos os ensaios e as imagens das amostras de 4 mm e 5 mm de espessura. Para cada sequência de velocidades testadas (1 a 100 mm/s) foram capturadas quatro imagens com ampliação de 0,7x. A primeira apresentando os resultados com as velocidades de 1 a 25 mm/s, a segunda, de 30 a 55 mm/s, a terceira, de 60 a 85 mm/s, e a quarta e última, de 90 a 100 mm/s. Considerando as três amostras, e quatro porções, de cada espécie, extremidade e meio, o total das imagens de microestereoscopia obtidas para as referidas espessuras foi de 1.152 unidades. Da Figura 39 a Figura 44 são apresentadas as quatro imagens de microestereoscopia unidas, com os resultados das velocidades testadas (de 1 a 100 mm/s), na extremidade e meio das amostras de 4 e 5 mm de cada espécie de madeira em estudo.

Figura 39 – Angelim da mata: ensaio com traços retos em amostras de 4 mm e 5 mm.



À esquerda, amostras após o ensaio de corte a laser com traços retos; e à direita, fotomontagem das imagens de microestereoscopia mostrando os resultados das diferentes velocidades testadas (1 a 100 mm/s), da esquerda para direita em ordem crescente. (A) amostra de 4 mm; (B) imagens de microestereoscopia da extremidade da amostra de 4 mm; (C) imagens de microestereoscopia do meio da amostra de 4 mm; (D) amostra de 5 mm; (E) imagens de microestereoscopia da extremidade da amostra de 5 mm; e (F) imagens de microestereoscopia do meio da amostra de 5 mm. Para ambas amostras, percebe-se que quanto maior a velocidade, menor a profundidade do corte.

Figura 40 – Cedro mara: ensaio com traços retos em amostras de 4 mm e 5 mm.



À esquerda, amostras após o ensaio de corte a laser com traços retos; e à direita, fotomontagem das imagens de microestereoscopia mostrando os resultados das diferentes velocidades testadas (1 a 100 mm/s), da esquerda para direita em ordem crescente. (A) amostra de 4 mm; (B) imagens de microestereoscopia da extremidade da amostra de 4 mm; (C) imagens de microestereoscopia do meio da amostra de 4 mm; (D) amostra de 5 mm; (E) imagens de microestereoscopia da extremidade da amostra de 5 mm; e (F) imagens de microestereoscopia do meio da amostra de 5 mm. Para ambas amostras, percebe-se que quanto maior a velocidade, menor a profundidade do corte.

Figura 41 – Garapeira: ensaio com traços retos em amostras de 4 mm e 5 mm.



À esquerda, amostras após o ensaio de corte a laser com traços retos; e à direita, fotomontagem das imagens de microestereoscopia mostrando os resultados das diferentes velocidades testadas (1 a 100 mm/s), da esquerda para direita em ordem crescente. (A) amostra de 4 mm; (B) imagens de microestereoscopia da extremidade da amostra de 4 mm; (C) imagens de microestereoscopia do meio da amostra de 4 mm; (D) amostra de 5 mm; (E) imagens de microestereoscopia da extremidade da amostra de 5 mm; e (F) imagens de microestereoscopia do meio da amostra de 5 mm. Para ambas amostras, percebe-se que quanto maior a velocidade, menor a profundidade do corte.

Figura 42 – Itaúba: ensaio com traços retos em amostras de 4 mm e 5 mm.



À esquerda, amostras após o ensaio de corte a laser com traços retos; e à direita, fotomontagem das imagens de microestereoscopia mostrando os resultados das diferentes velocidades testadas (1 a 100 mm/s), da esquerda para direita em ordem crescente. (A) amostra de 4 mm; (B) imagens de microestereoscopia da extremidade da amostra de 4 mm; (C) imagens de microestereoscopia do meio da amostra de 4 mm; (D) amostra de 5 mm; (E) imagens de microestereoscopia da extremidade da amostra de 5 mm; e (F) imagens de microestereoscopia do meio da amostra de 5 mm. Para ambas amostras, percebe-se que quanto maior a velocidade, menor a profundidade do corte.

Figura 43 – Louro amazonense: ensaio com traços retos em amostras de 4 mm e 5 mm.



À esquerda, amostras após o ensaio de corte a laser com traços retos; e à direita, fotomontagem das imagens de microestereoscopia mostrando os resultados das diferentes velocidades testadas (1 a 100 mm/s), da esquerda para direita em ordem crescente. (A) amostra de 4 mm; (B) imagens de microestereoscopia da extremidade da amostra de 4 mm; (C) imagens de microestereoscopia do meio da amostra de 4 mm; (D) amostra de 5 mm; (E) imagens de microestereoscopia da extremidade da amostra de 5 mm; e (F) imagens de microestereoscopia do meio da amostra de 5 mm. Para ambas amostras, percebe-se que quanto maior a velocidade, menor a profundidade do corte.

Figura 44 – Tauari: ensaio com traços retos em amostras de 4 mm e 5 mm.



À esquerda, amostras após o ensaio de corte a laser com traços retos; e à direita, fotomontagem das imagens de microestereoscopia mostrando os resultados das diferentes velocidades testadas (1 a 100 mm/s), da esquerda para direita em ordem crescente. (A) amostra de 4 mm; (B) imagens de microestereoscopia da extremidade da amostra de 4 mm; (C) imagens de microestereoscopia do meio da amostra de 4 mm; (D) amostra de 5 mm; (E) imagens de microestereoscopia da extremidade da amostra de 5 mm; e (F) imagens de microestereoscopia do meio da amostra de 5 mm. Para ambas amostras, percebe-se que quanto maior a velocidade, menor a profundidade do corte.

Na Tabela 13, as maiores velocidades de ação do laser passíveis de romper por completo as lâminas de madeira nas espessuras de 4 e 5 mm. Estas velocidades foram consideradas como velocidades eficazes de corte. Tais velocidades apresentaram-se adequadas com os demais parâmetros sendo: potência entre 66,5 W e 70 W (95 e 100%), aceleração de 1.000 mm/s², e pressão do jato de ar para refrigeração de 1 bar.

Tabela 13 – Velocidades eficazes de corte para as espessuras 4 e 5 mm.

Espécies	Amostras de 4 mm	Amostras de 5 mm
angelim da mata	20 mm/s	15 mm/s
cedro mara	40 mm/s	25 mm/s
garapeira	25 mm/s	15 mm/s
itaúba	20 mm/s	10 mm/s
louro amazonense	15 mm/s	5 mm/s
tauari	20 mm/s	15 mm/s

As velocidades menores do que aquelas da Tabela 13 também ocasionaram o rompimento total das lâminas. Porém, elas geraram maior queima de material, já que o laser permaneceu em contato com a amostra por um intervalo de tempo maior. Estas velocidades são, portanto, inadequadas para a técnica da marchetaria, uma vez que as zonas afetadas pelo calor geram alteração na coloração da madeira e, muitas vezes, a queima desigual de material gera um contorno irregular das arestas, ou seja, um corte impreciso. Além disso, um dos critérios que se busca com esta pesquisa é a aceleração do procedimento da marchetaria, ratificando a importância do uso da maior velocidade cortante.

Já as velocidades maiores do que as constantes na Tabela 13 não obtiveram como resultado um corte eficaz. Ou seja, para tais velocidades, não houve o rompimento total das lâminas. Foi verificado que quando isto acontece, a porção superior da amostra, na região próxima ao corte, tem sua coloração alterada, provavelmente porque o jato de ar utilizado para resfriamento não atravessa a peça e o oxigênio acaba agindo como combustível da chama, aumentando a mesma e a sua capacidade de queima do material.

Os cortes gerados por estas velocidades maiores tiveram suas profundidades medidas, tanto na extremidade quanto no meio das amostras. Os gráficos (Figura 45 à Figura 50) que seguem apresentam as médias das profundidades atingidas por tais velocidades para as seis espécies de madeira nas espessuras 4 mm e 5 mm. As colunas que não aparecem nos gráficos são aquelas em que a velocidade de corte testada gerou o rompimento completo das lâminas. Para dados mais precisos das referidas profundidades, ver Apêndices A, B, C, D, E e

F, que exibem tabelas com os valores das médias, máximas, mínimas e desvios padrão medidos nas seis espécies de madeira.

Figura 45 – Gráfico representativo das profundidades dos cortes resultantes da ação do laser nas velocidades maiores do que a eficaz – Angelim da mata – 4 e 5 mm.

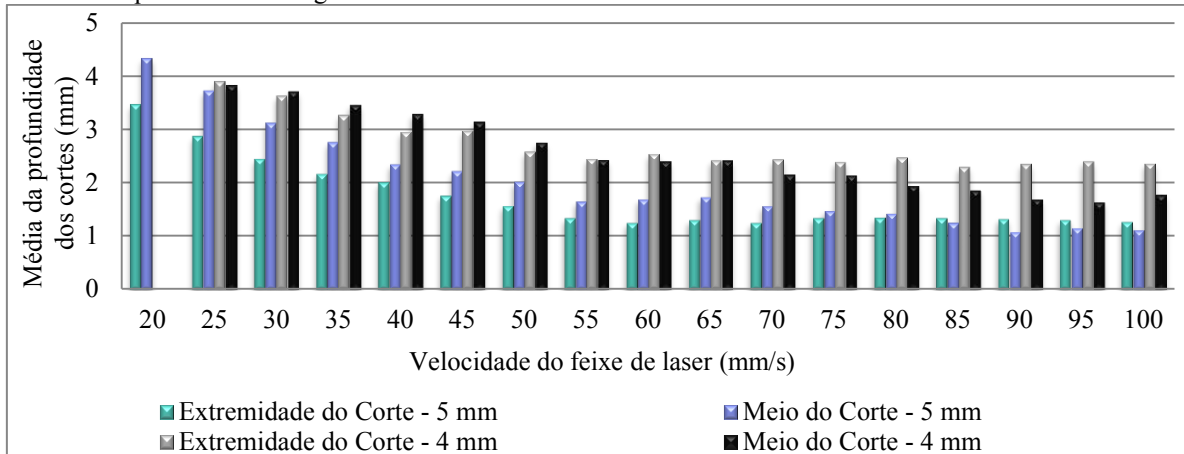


Figura 46 – Gráfico representativo das profundidades dos cortes resultantes da ação do laser nas velocidades maiores do que a eficaz – Cedro mara – 4 e 5 mm.

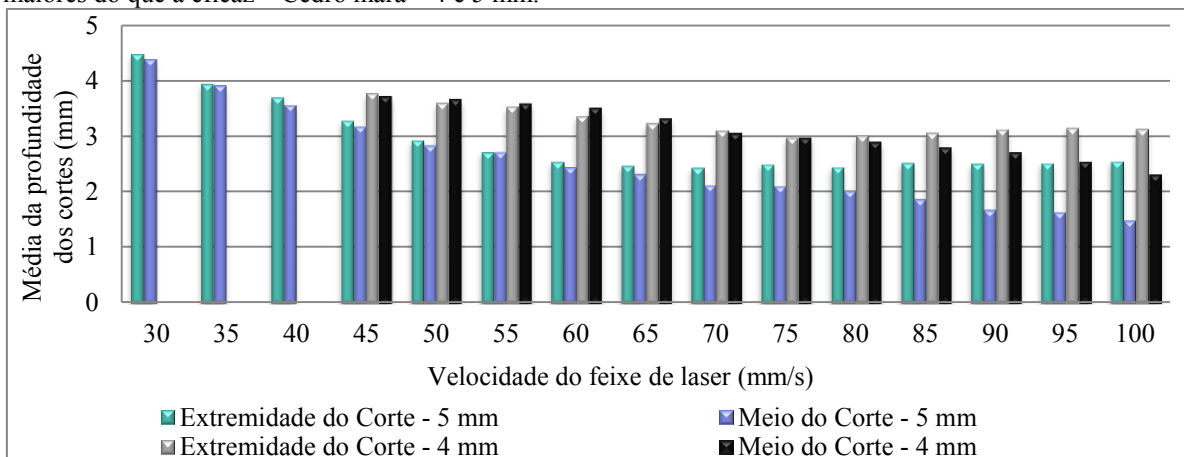


Figura 47 – Gráfico representativo das profundidades dos cortes resultantes da ação do laser nas velocidades maiores do que a eficaz – Garapeira – 4 e 5 mm.

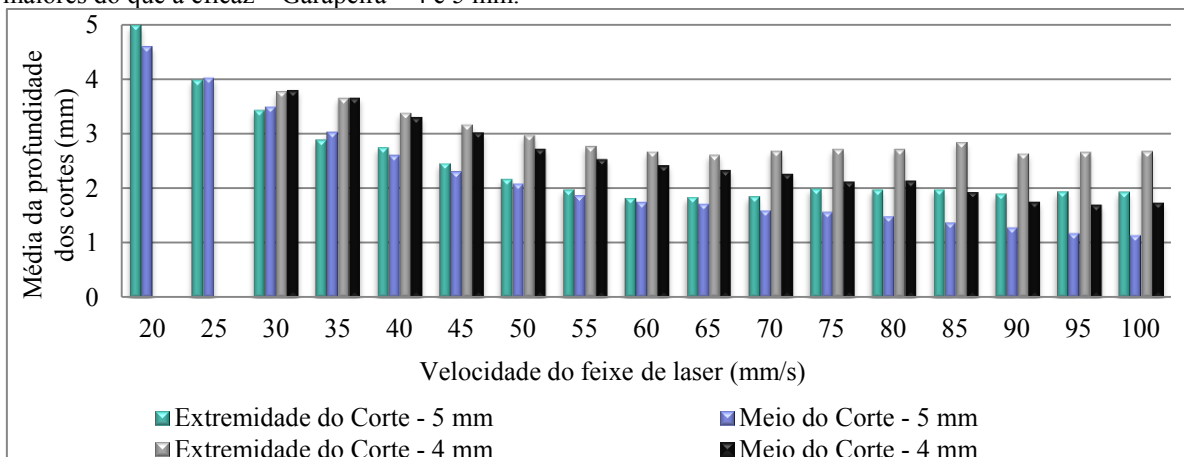


Figura 48 – Gráfico representativo das profundidades dos cortes resultantes da ação do laser nas velocidades maiores do que a eficaz – Itaúba – 4 e 5 mm.

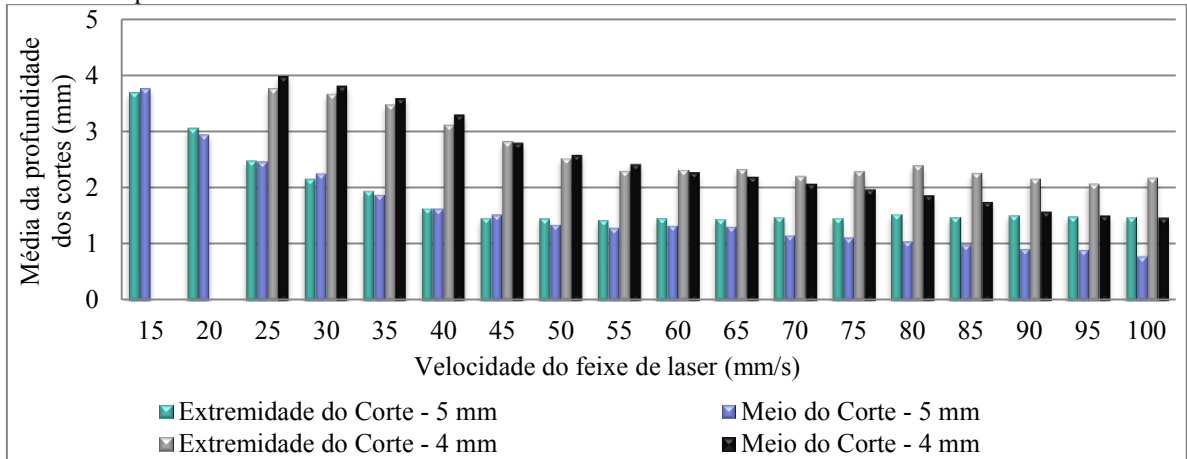


Figura 49 – Gráfico representativo das profundidades dos cortes resultantes da ação do laser nas velocidades maiores do que a eficaz – Louro amazense – 4 e 5 mm.

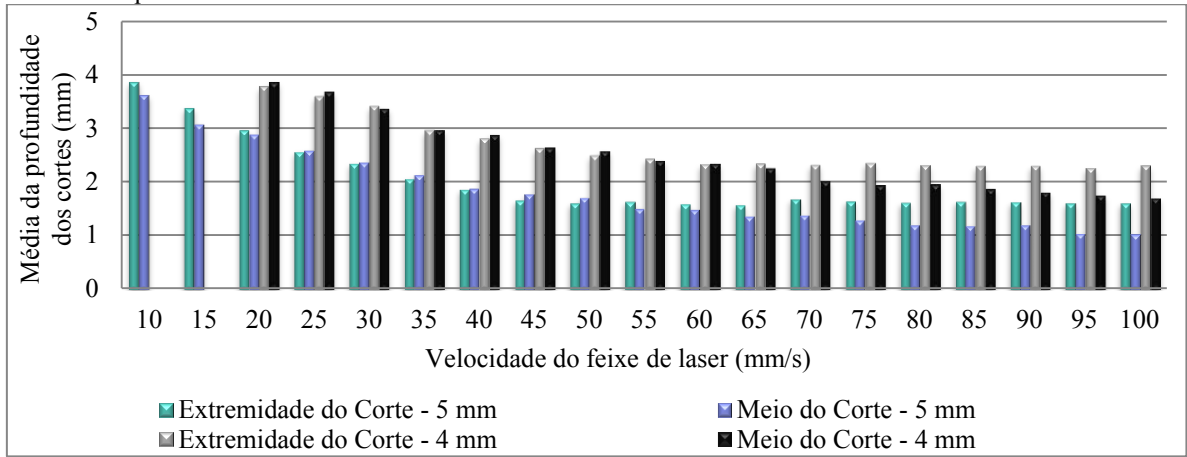
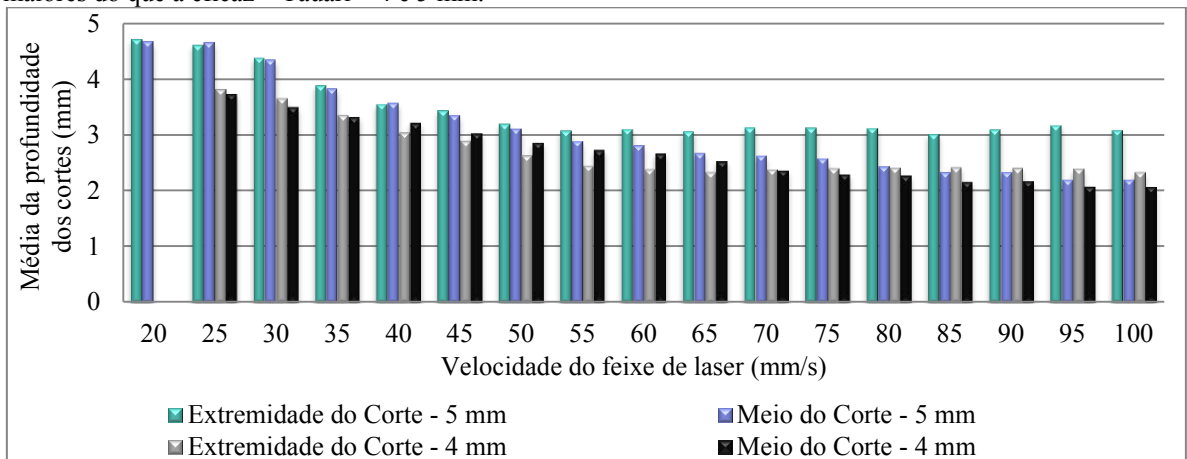


Figura 50 – Gráfico representativo das profundidades dos cortes resultantes da ação do laser nas velocidades maiores do que a eficaz – Tauari – 4 e 5 mm.

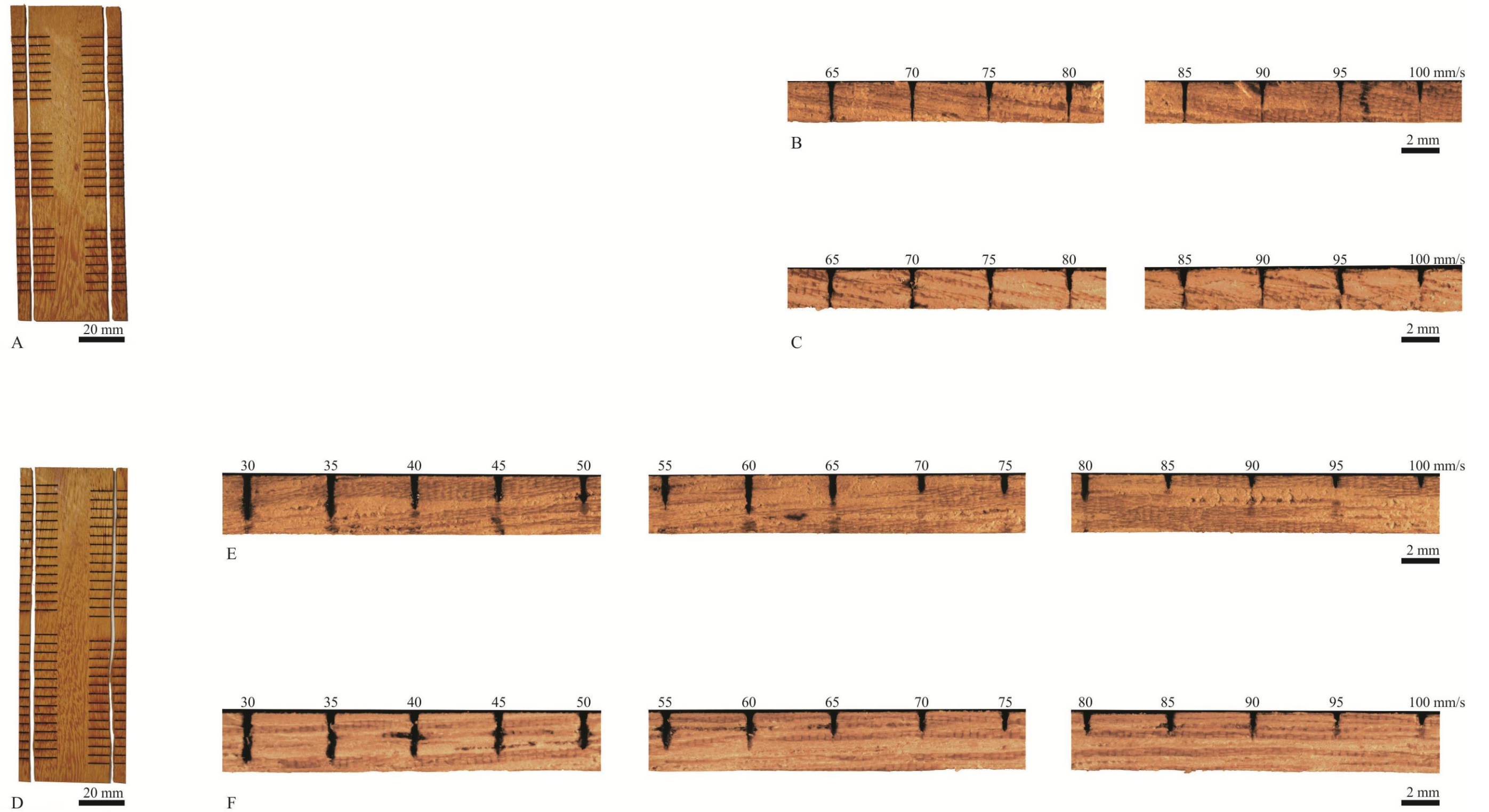


Dos gráficos apresentados, é possível identificar que para a mesma velocidade do feixe de laser, em todas as espécies, a profundidade de corte difere de acordo com a espessura da lâmina. Em todos os casos, variando o percentual, as amostras de 4 mm apresentaram cortes mais profundos, provavelmente porque as lâminas de espessuras menores, para o corte no sentido topo-base, têm menos material para ser vaporizado, e, portanto, uma menor barreira a ser vencida pela ação do laser.

Foi também percebido que a aceleração tem influência sobre a profundidade do corte. Para velocidades maiores, as profundidades medidas na parte central dos cortes são menores do que as medidas na extremidade, enquanto que para as velocidades menores, ocorre o contrário. Assim, para velocidades maiores ocorre o esperado, ou seja, enquanto o equipamento acelera tem velocidade menor, ocasionando um maior tempo de interação laser-material e um corte mais profundo. Para velocidades menores há divergências, talvez porque o tempo de aceleração seja muito pequeno ou por não haver um bom controle de aceleração no equipamento (torque, inércia).

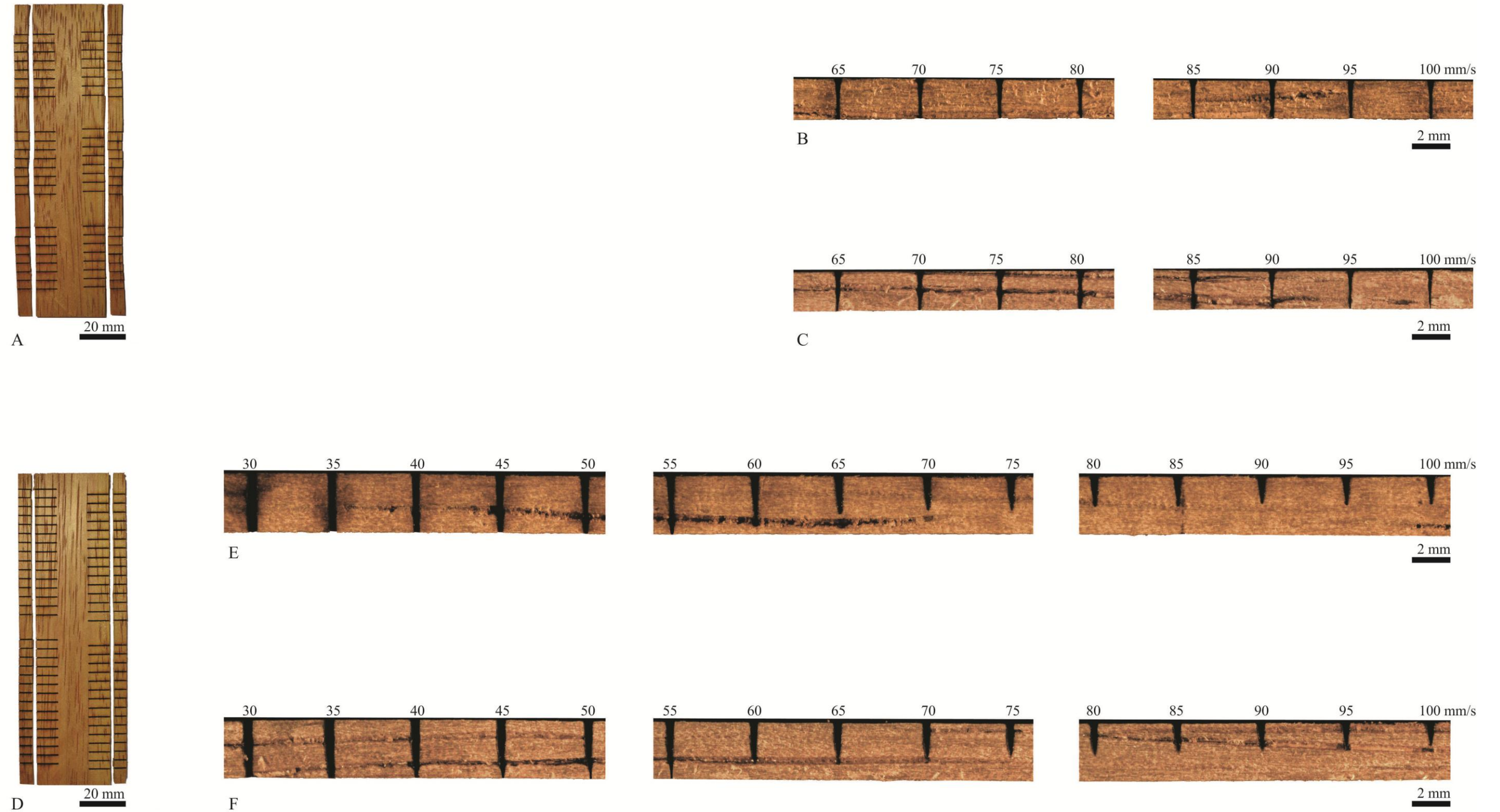
A partir dos resultados encontrados para as lâminas de 4 e 5 mm, foram definidas as velocidades de teste para as lâminas de 2 e 3 mm de espessura. A sequência de velocidades testadas foi de 65 a 100 mm/s e 30 a 100 mm/s, respectivamente. Para avaliação dos cortes gerados, foi também utilizada a microestereoscopia. Da sequência de velocidades das lâminas de 2 mm, foram obtidas duas imagens com ampliação de 0,7x. A primeira com os resultados das velocidades de 65 a 80 mm/s e a segunda, de 85 a 100 mm/s. Da sequência de velocidades das lâminas de 3 mm, foram obtidas três imagens com ampliação de 0,7x. A primeira com os resultados das velocidades de 30 a 50 mm/s, a segunda, de 55 a 75 mm/s, e a terceira, de 80 a 100 mm/s. Considerando o número de amostras e porções das mesmas, extremidade e meio e as seis espécies, o total de imagens de microestereoscopia para as lâminas de 2 e 3 mm, foi, respectivamente, 288 e 432 unidades. Da Figura 51 à Figura 56 são apresentadas imagens de microestereoscopia com os resultados das velocidades testadas na extremidade e meio das amostras de 2 e 3 mm de cada espécie de madeira em estudo.

Figura 51 – Angelim da mata: ensaio com traços retos em amostras de 2 mm e 3 mm.



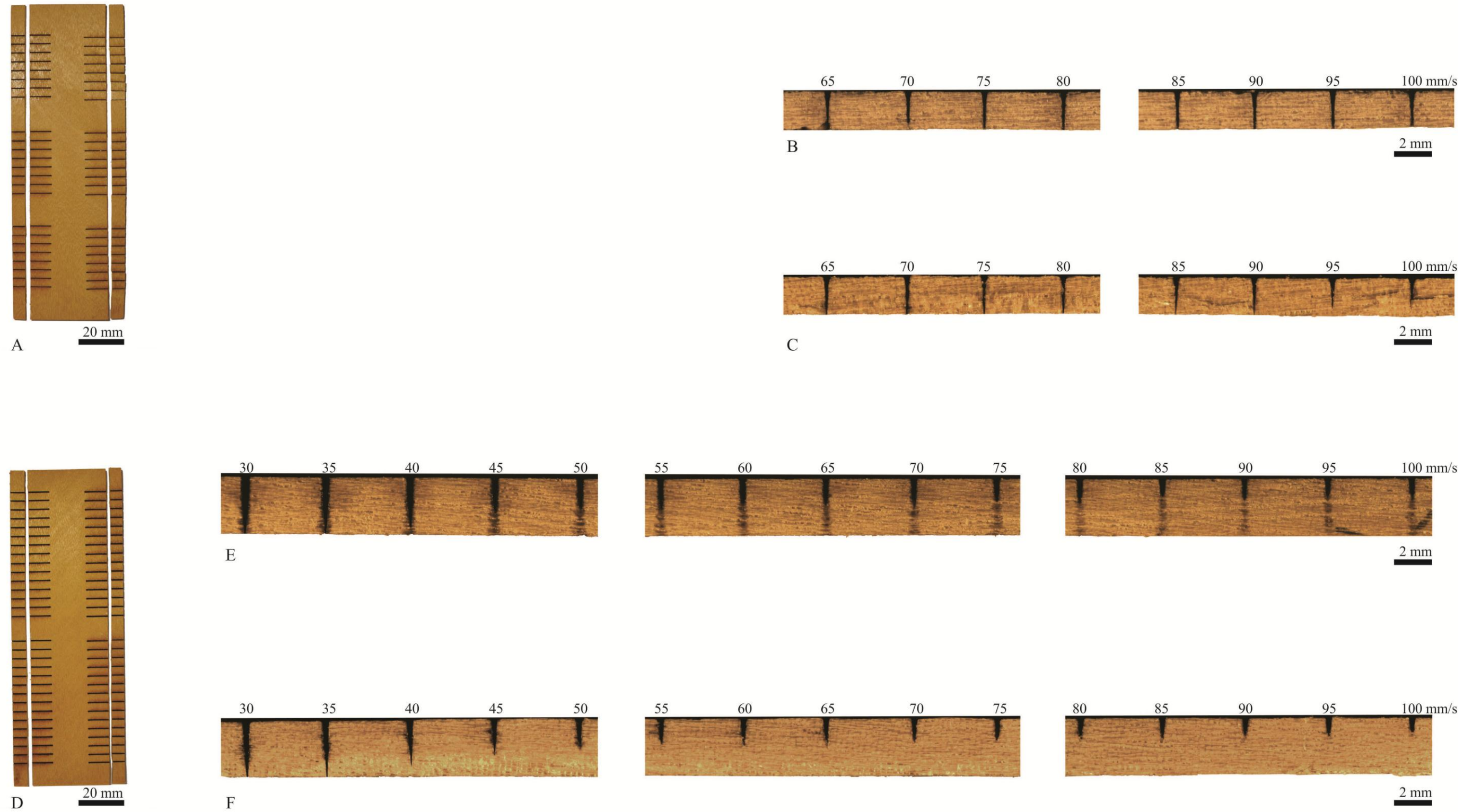
À esquerda, amostras após o ensaio de corte a laser com traços retos; e à direita, fotomontagem das imagens de microestereoscopia mostrando os resultados das diferentes velocidades testadas (65 a 100 mm/s para lâminas de 2 mm e 30 a 100 mm/s para lâminas de 3 mm), da esquerda para direita em ordem crescente. (A) amostra de 2 mm; (B) imagens de microestereoscopia da extremidade da amostra de 2 mm; (C) imagens de microestereoscopia do meio da amostra de 2 mm; (D) amostra de 3 mm; (E) imagens de microestereoscopia da extremidade da amostra de 3 mm; e (F) imagens de microestereoscopia do meio da amostra de 3 mm.

Figura 52 – Cedro mara: ensaio com traços retos em amostras de 2 mm e 3 mm.



À esquerda, amostras após o ensaio de corte a laser com traços retos; e à direita, fotomontagem das imagens de microestereoscopia mostrando os resultados das diferentes velocidades testadas (65 a 100 mm/s para lâminas de 2 mm e 30 a 100 mm/s para lâminas de 3 mm), da esquerda para direita em ordem crescente. (A) amostra de 2 mm; (B) imagens de microestereoscopia da extremidade da amostra de 2 mm; (C) imagens de microestereoscopia do meio da amostra de 2 mm; (D) amostra de 3 mm; (E) imagens de microestereoscopia da extremidade da amostra de 3 mm; e (F) imagens de microestereoscopia do meio da amostra de 3 mm.

Figura 53 – Garapeira: ensaio com traços retos em amostras de 2 mm e 3 mm.



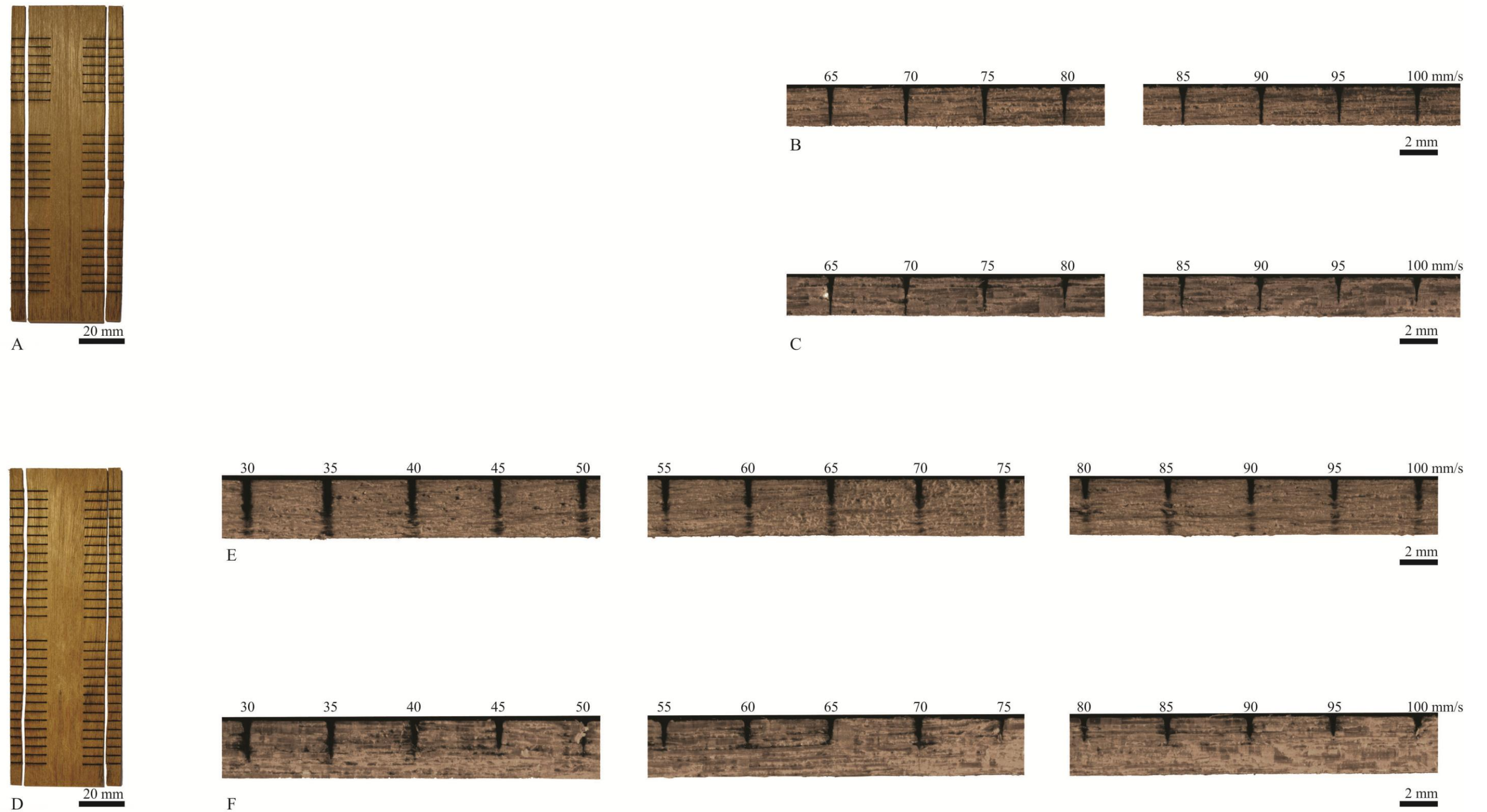
À esquerda, amostras após o ensaio de corte a laser com traços retos; e à direita, fotomontagem das imagens de microestereoscopia mostrando os resultados das diferentes velocidades testadas (65 a 100 mm/s para lâminas de 2 mm e 30 a 100 mm/s para lâminas de 3 mm), da esquerda para direita em ordem crescente. (A) amostra de 2 mm; (B) imagens de microestereoscopia da extremidade da amostra de 2 mm; (C) imagens de microestereoscopia do meio da amostra de 2 mm; (D) amostra de 3 mm; (E) imagens de microestereoscopia da extremidade da amostra de 3 mm; e (F) imagens de microestereoscopia do meio da amostra de 3 mm.

Figura 54 – Itaúba: ensaio com traços retos em amostras de 2 mm e 3 mm.



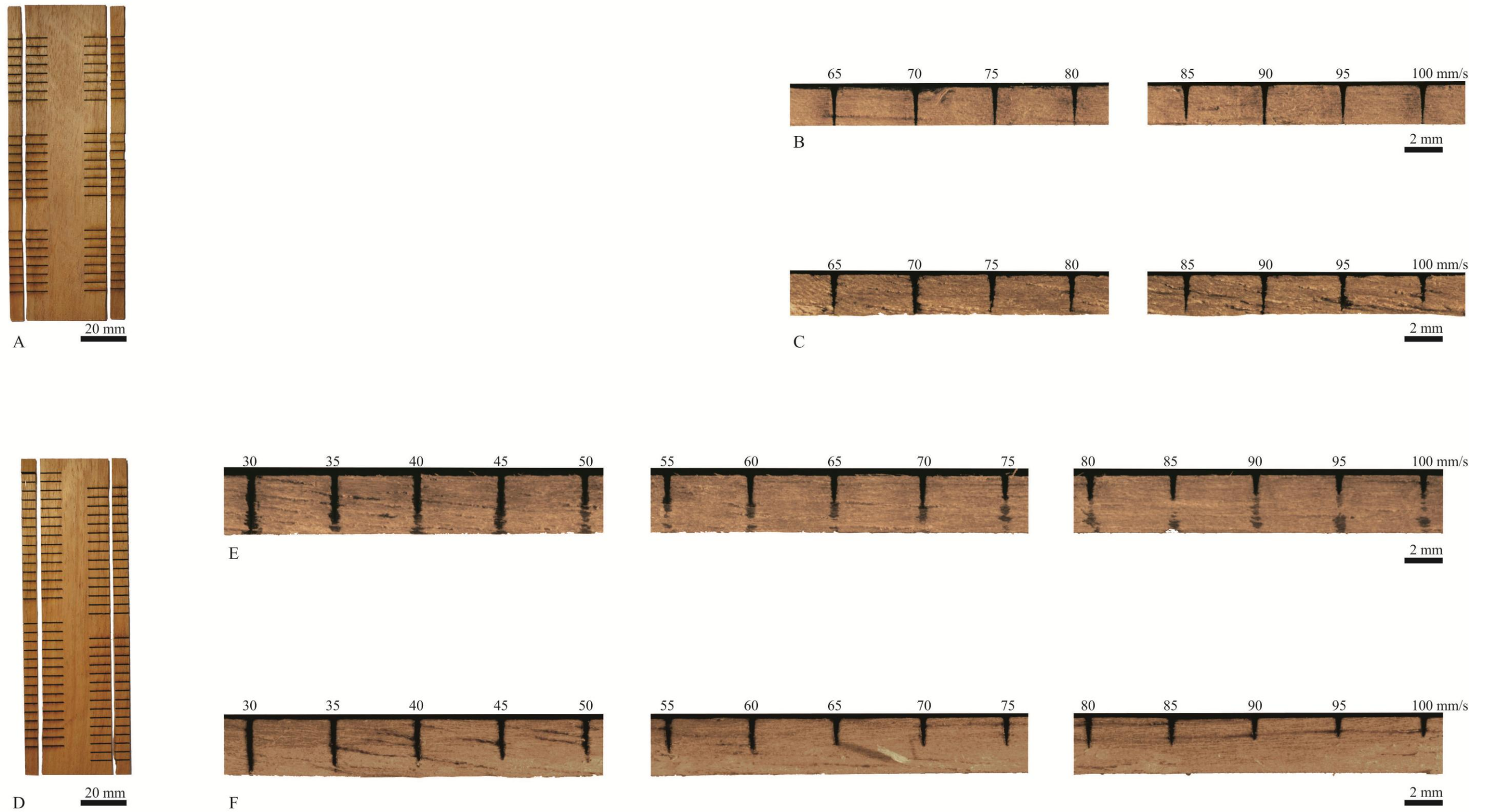
À esquerda, amostras após o ensaio de corte a laser com traços retos; e à direita, fotomontagem das imagens de microestereoscopia mostrando os resultados das diferentes velocidades testadas (65 a 100 mm/s para lâminas de 2 mm e 30 a 100 mm/s para lâminas de 3 mm), da esquerda para direita em ordem crescente. (A) amostra de 2 mm; (B) imagens de microestereoscopia da extremidade da amostra de 2 mm; (C) imagens de microestereoscopia do meio da amostra de 2 mm; (D) amostra de 3 mm; (E) imagens de microestereoscopia da extremidade da amostra de 3 mm; e (F) imagens de microestereoscopia do meio da amostra de 3 mm.

Figura 55 – Louro amazonense: ensaio com traços retos em amostras de 2 mm e 3 mm.



À esquerda, amostras após o ensaio de corte a laser com traços retos; e à direita, fotomontagem das imagens de microestereoscopia mostrando os resultados das diferentes velocidades testadas (65 a 100 mm/s para lâminas de 2 mm e 30 a 100 mm/s para lâminas de 3 mm), da esquerda para direita em ordem crescente. (A) amostra de 2 mm; (B) imagens de microestereoscopia da extremidade da amostra de 2 mm; (C) imagens de microestereoscopia do meio da amostra de 2 mm; (D) amostra de 3 mm; (E) imagens de microestereoscopia da extremidade da amostra de 3 mm; e (F) imagens de microestereoscopia do meio da amostra de 3 mm.

Figura 56 – Tauari: ensaio com traços retos em amostras de 2 mm e 3 mm.



À esquerda, amostras após o ensaio de corte a laser com traços retos; e à direita, fotomontagem das imagens de microestereoscopia mostrando os resultados das diferentes velocidades testadas (65 a 100 mm/s para lâminas de 2 mm e 30 a 100 mm/s para lâminas de 3 mm), da esquerda para direita em ordem crescente. (A) amostra de 2 mm; (B) imagens de microestereoscopia da extremidade da amostra de 2 mm; (C) imagens de microestereoscopia do meio da amostra de 2 mm; (D) amostra de 3 mm; (E) imagens de microestereoscopia da extremidade da amostra de 3 mm; e (F) imagens de microestereoscopia do meio da amostra de 3 mm.

A Tabela 14 apresenta as velocidades eficazes de corte, maiores velocidades de ação do laser capazes de romper por completo as lâminas de madeira, de cada espécie nas espessuras de 2 e 3 mm. Assim como para as lâminas de 4 e 5 mm de espessura, os demais parâmetros utilizados foram: potência entre 66,5 W e 70 W (95 e 100%), aceleração de 1.000 mm/s², e pressão do jato de ar para refrigeração de 1 bar.

Tabela 14 – Velocidades eficazes de corte para as espessuras 2 e 3 mm.

Espécies	Amostras de 2 mm	Amostras de 3 mm
angelim da mata	70 mm/s	25 mm/s
cedro mara	100 mm/s	55 mm/s
garapeira	90 mm/s	35 mm/s
itaúba	70 mm/s	25 mm/s
louro amazonense	70 mm/s	20 mm/s
tauari	70 mm/s	20 mm/s

Análogo às lâminas de 4 e 5 mm, para as lâminas de 2 e 3 mm, as velocidades maiores do que as constantes na Tabela 14 não obtiveram um corte efetivo. Ou seja, o corte não aconteceu do topo à base da lâmina. As profundidades atingidas por tais cortes também foram medidas, tanto na extremidade quanto no meio das amostras. Os dados obtidos deram origem aos gráficos (Figura 57 à Figura 62) que seguem e às tabelas constantes nos Apêndices A, B, C, D, E e F.

Figura 57 – Gráfico representativo das profundidades dos cortes resultantes da ação do laser nas velocidades maiores do que a eficaz – Angelim da mata – 2 e 3 mm.

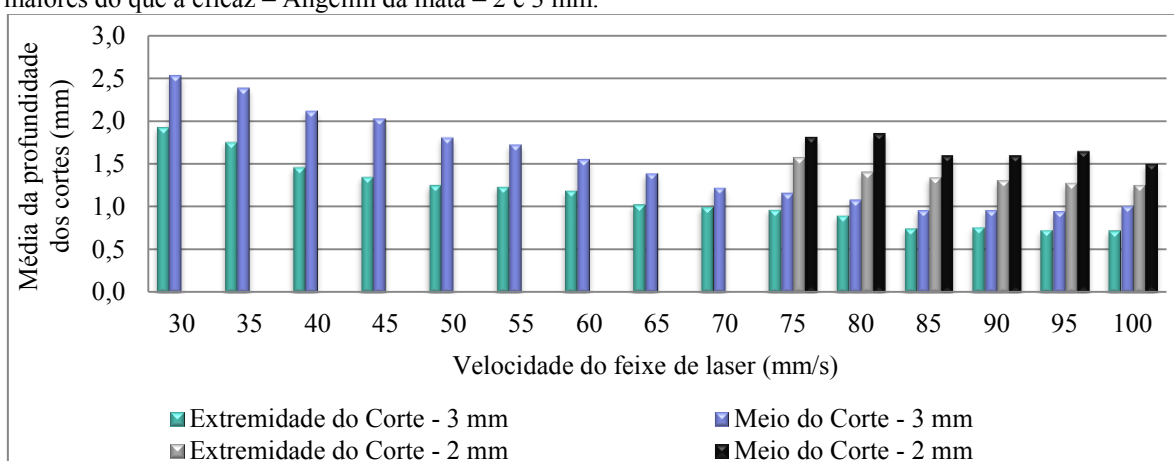


Figura 58 – Gráfico representativo das profundidades dos cortes resultantes da ação do laser nas velocidades maiores do que a eficaz – Cedro mara – 2 e 3 mm.

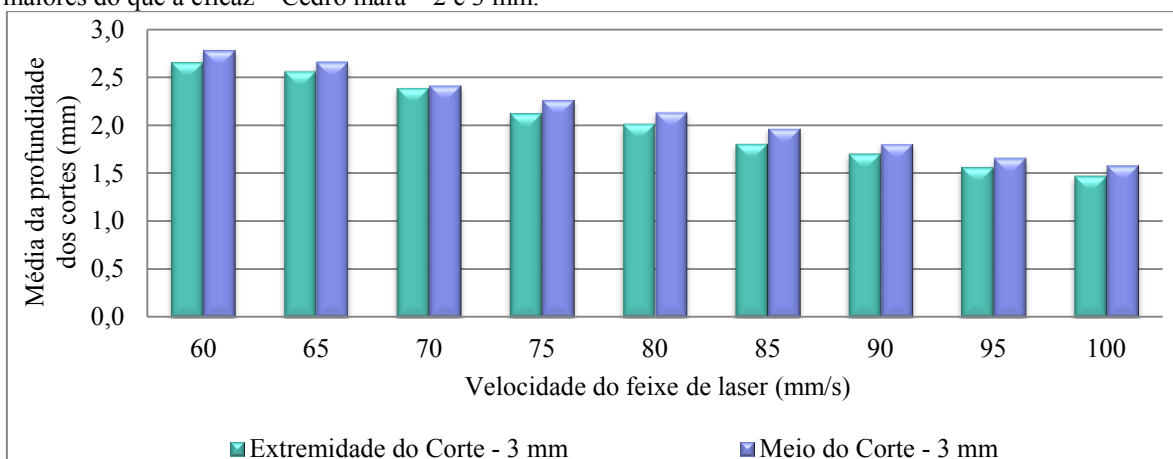


Figura 59 – Gráfico representativo das profundidades dos cortes resultantes da ação do laser nas velocidades maiores do que a eficaz – Garapeira – 2 e 3 mm.

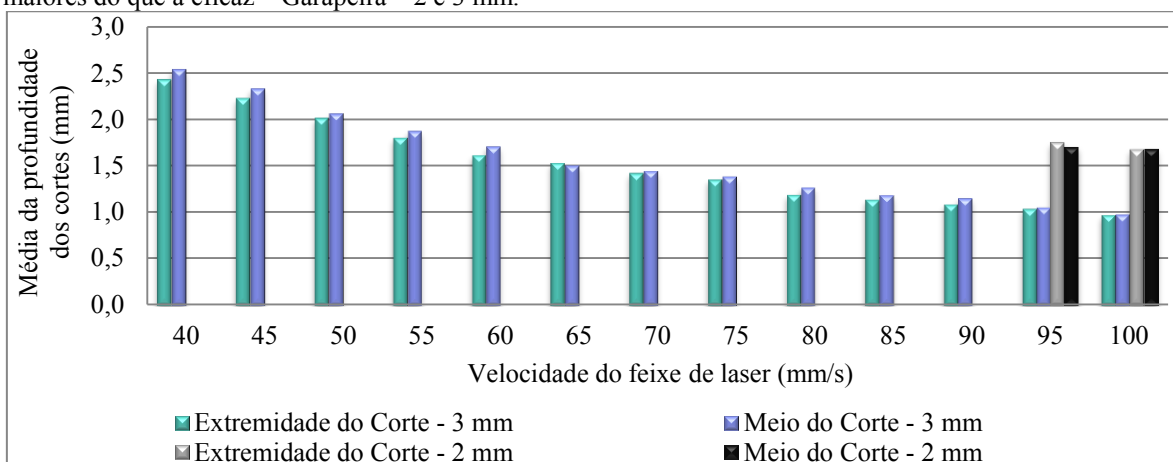


Figura 60 – Gráfico representativo das profundidades dos cortes resultantes da ação do laser nas velocidades maiores do que a eficaz – Itaúba – 2 e 3 mm.

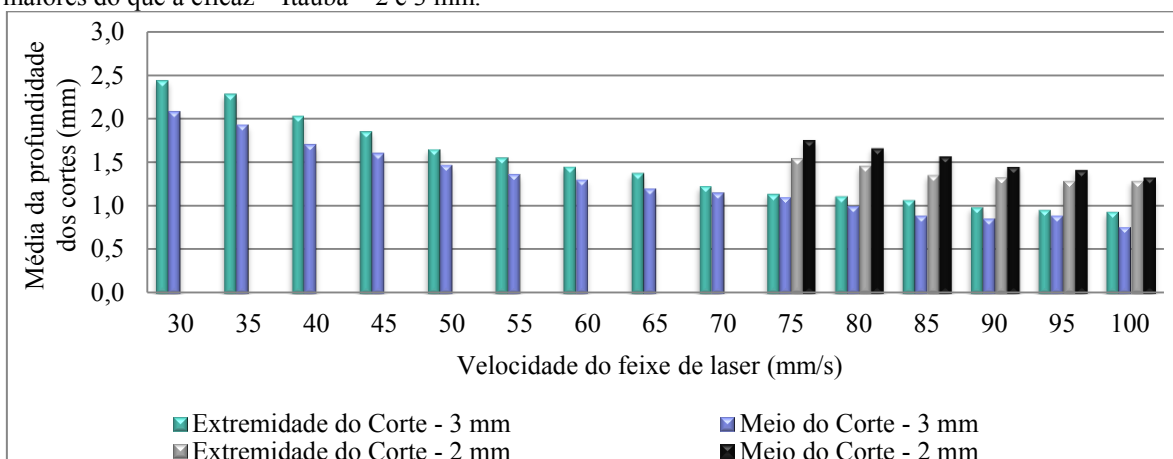


Figura 61 – Gráfico representativo das profundidades dos cortes resultantes da ação do laser nas velocidades maiores do que a eficaz – Louro amazonense – 2 e 3 mm.

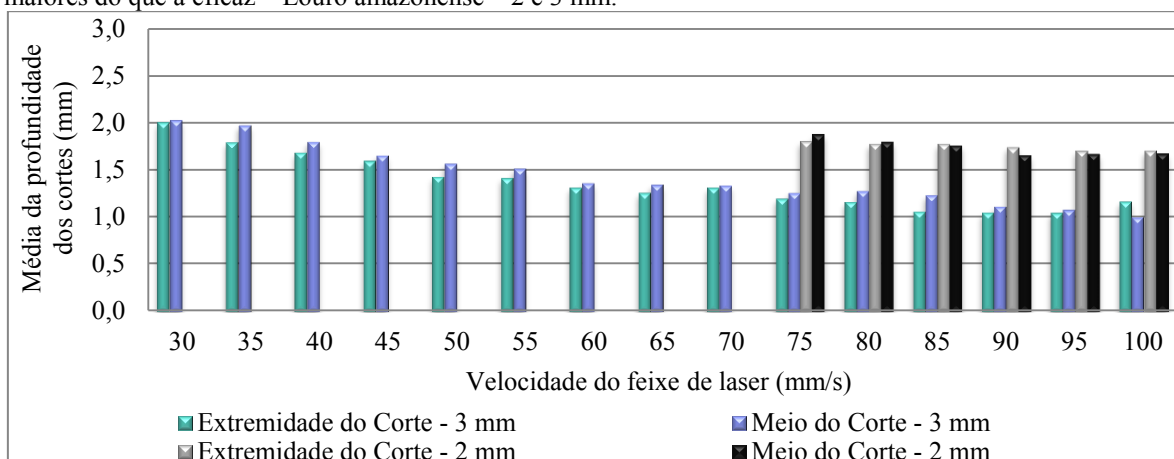
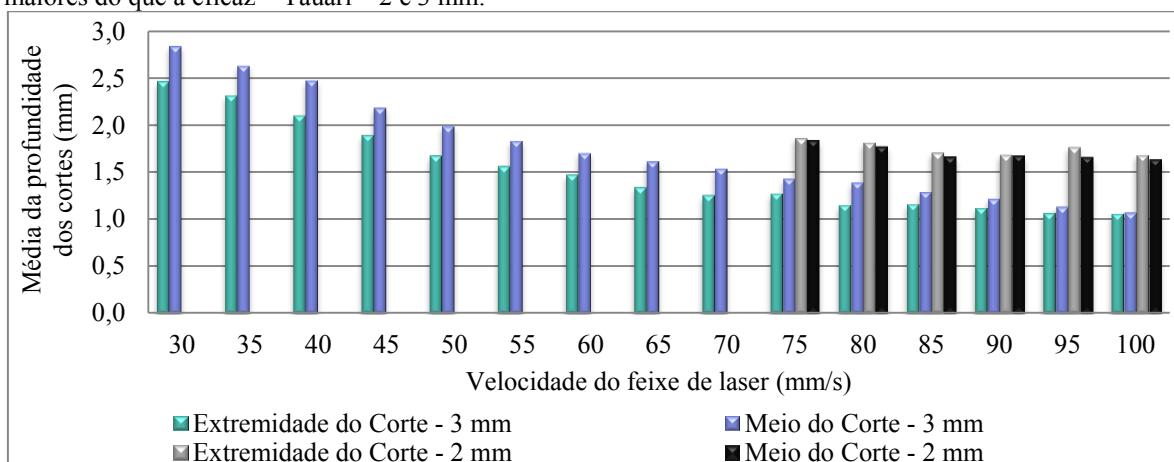


Figura 62 – Gráfico representativo das profundidades dos cortes resultantes da ação do laser nas velocidades maiores do que a eficaz – Tauari – 2 e 3 mm.



Apesar dos resultados obtidos com os cortes das lâminas de 4 e 5 mm indicarem que a partir da velocidade de 30 mm/s as lâminas de 3 mm das seis espécies de madeira poderiam apresentar um corte efetivo, em quatro destas espécies não houve o rompimento da lâmina. As lâminas de 3 mm das espécies angelim da mata, itaúba, louro amazonense e tauari apresentaram um corte do topo à base da amostra com a ação do laser somente a velocidades menores do que 30 mm/s.

O fato das lâminas de 3 mm destas quatro espécies não haverem se rompido com a velocidade de 30 mm/s, mesmo quando as lâminas de 4 mm sob a ação do feixe de laser a esta mesma velocidade apresentaram uma profundidade de corte maior do que 3 mm, contraria a hipótese de que quanto menos material a ser vaporizado pela ação do laser, mais profundo é o corte. Por outro lado, é possível identificar que as amostras de 2 mm tiveram cortes mais profundos do que as de 3 mm para uma mesma velocidade, validando a suposição anterior.

É necessário esclarecer que os ensaios realizados nas amostras de 4 e 5 mm de espessura, e nas de 2 e 3 mm, ocorreram em dias diferentes. Uma vez que o equipamento de corte a laser utilizado para este estudo está localizado em um ambiente não climatizado, e, portanto, passível de variações de temperatura e umidade do ar, é possível que o processamento a laser não apresente um comportamento regular e tenha alterações com as interferências do meio, gerando incoerências como esta anteriormente apontada (relação entre a velocidade e a quantidade de material a ser vaporizado).

Da mesma forma que as lâminas de maior espessura testadas, as de 2 e 3 mm sugerem que a variável aceleração influencia na profundidade do corte, porém, apresentaram um resultado divergente do anterior. Para a quase totalidade das espécies, as velocidades testadas geraram um corte mais profundo na parte central, sugerindo que no momento de aceleração do equipamento para atingir a velocidade desejada, a velocidade é maior. Quando a velocidade desejada é atingida, esta se torna constante e a aceleração passa a ser nula. Somente nas lâminas de 3 mm da espécie itaúba e nas de 2 mm da tauari, ocorreu o contrário, ou seja, os cortes foram mais profundos na extremidade.

A partir dos dados colhidos dos ensaios das seis espécies de madeira e das quatro espessuras, foi possível determinar a eficácia da velocidade de 100 mm/s no corte do topo à base das lâminas de 1 mm de todas as espécies.

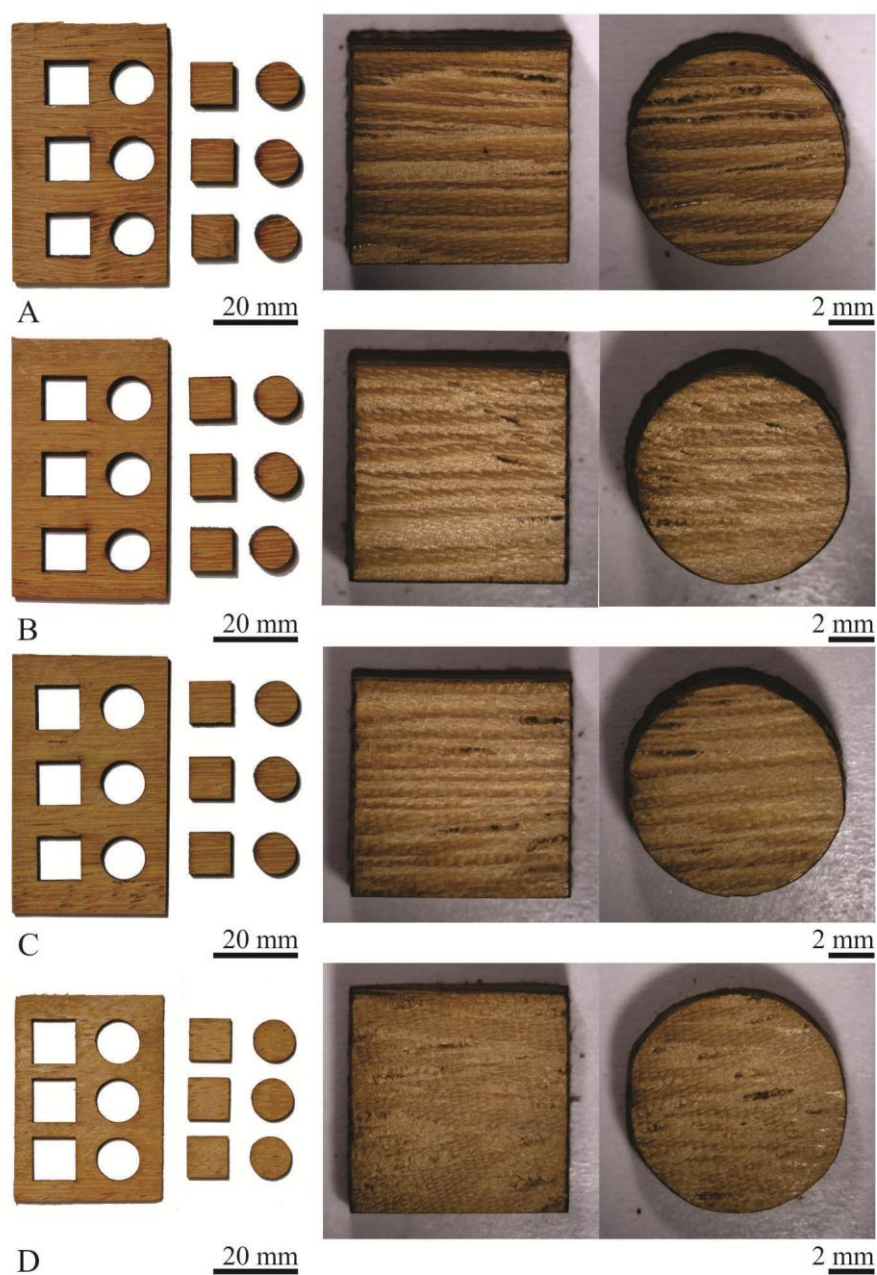
4.4.2 Ensaio 02 – Círculos e Quadrados

Com as velocidades determinadas a partir do ensaio com traços retos, foi possível a realização do ensaio com círculos e quadrados. Para cada espessura de lâmina e espécie de madeira foram utilizadas três amostras. Em cada uma delas, medindo aproximadamente 60 x 35 mm, foram extraídos três círculos projetados com 10 mm de diâmetro e três quadrados projetados com seção de 10 x 10 mm.

Este ensaio não foi realizado em amostras de 1 mm da espécie angelim da mata devido à dificuldade de transformação dos rejeitos desta espécie em lâminas de espessura excessivamente delgada, provavelmente pelo material inorgânico encontrado em sua composição.

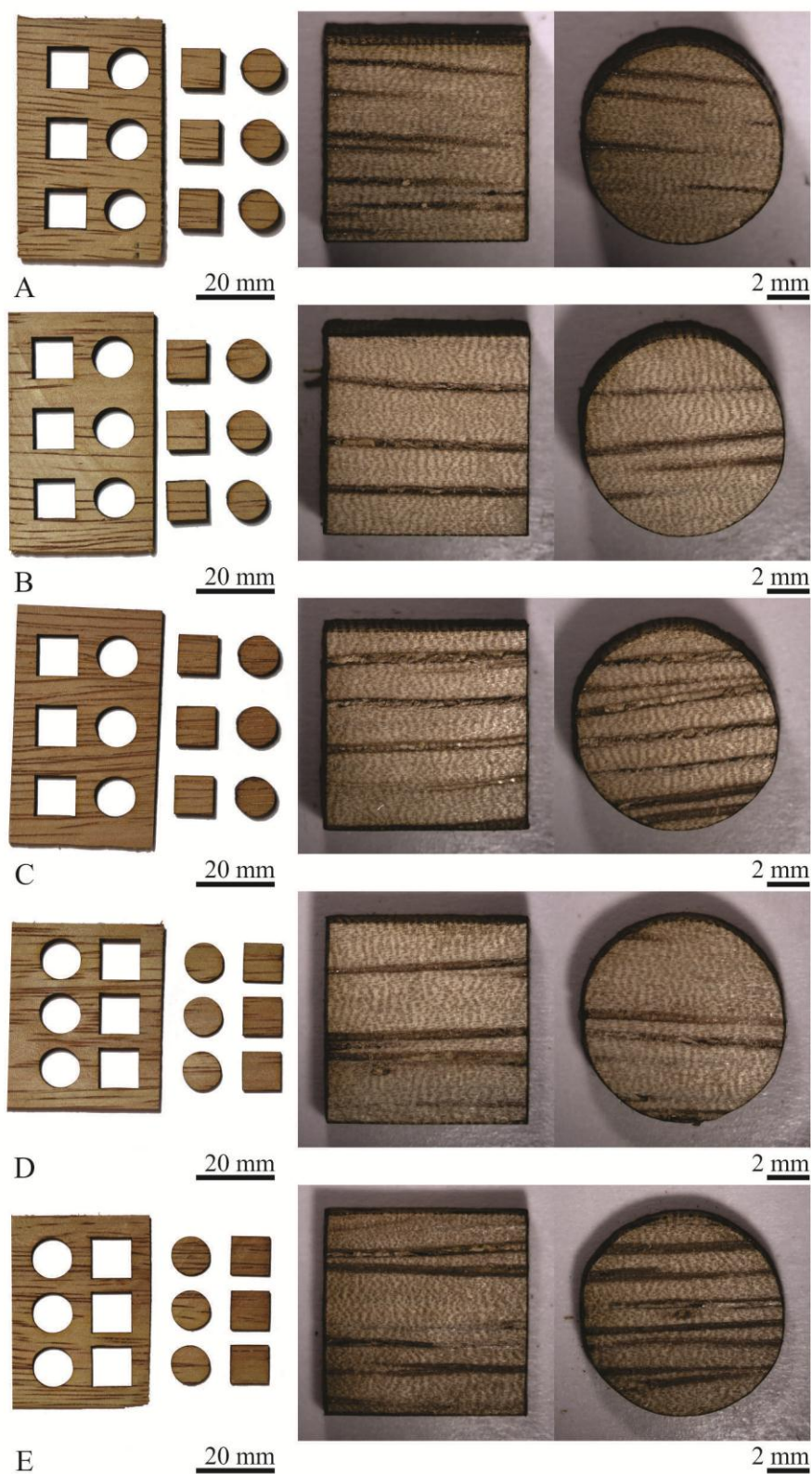
Após realizados os ensaios foram feitas imagens de microestereoscopia para avaliação do processo (Figura 63 à Figura 68). As imagens capturadas das peças cortadas, os quadrados e círculos, foram feitas separadamente, num total de 522 unidades.

Figura 63 – Angelim da mata: ensaio com círculos e quadrados.



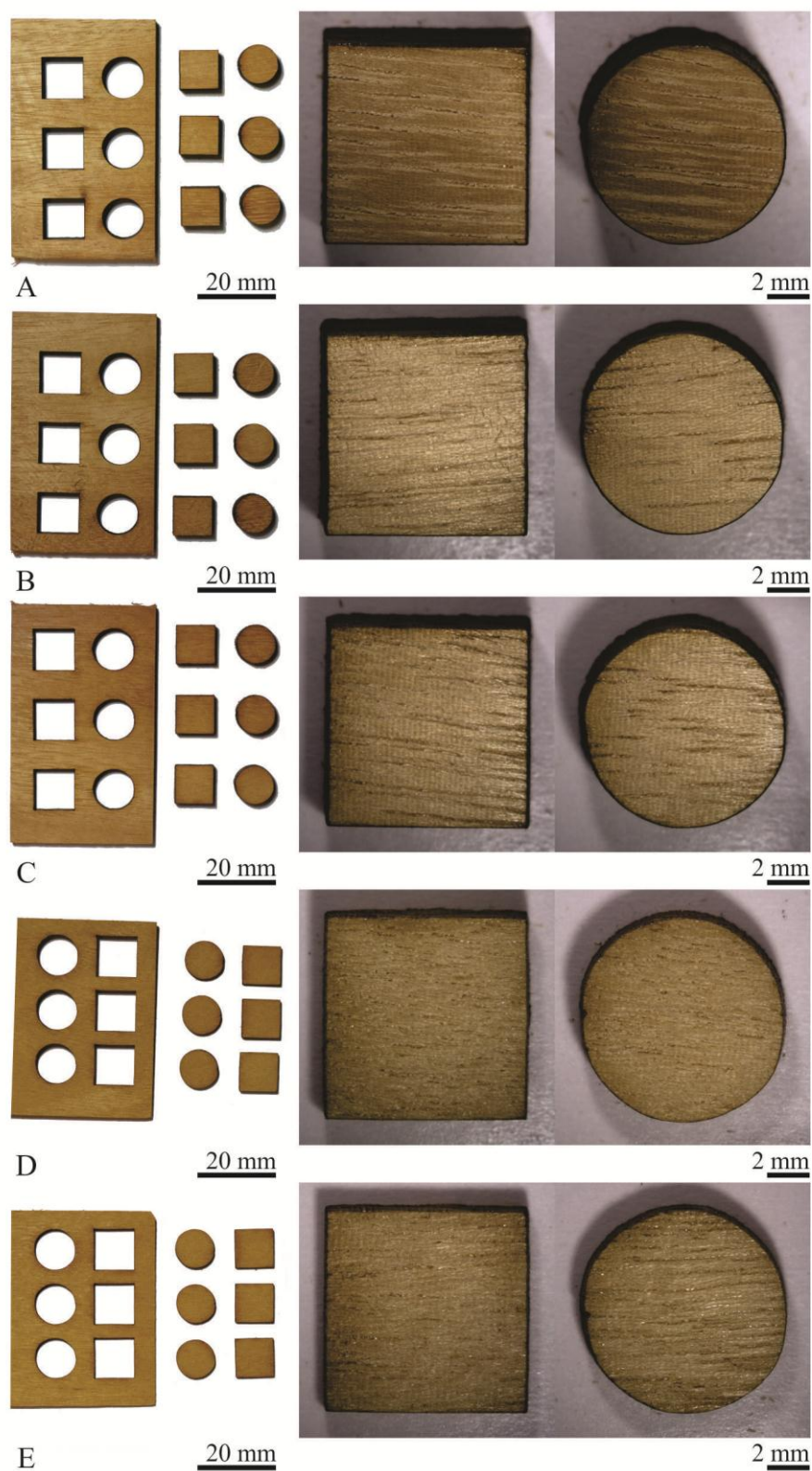
À esquerda, amostras após o ensaio de corte a laser com círculos e quadrados; e à direita, imagens de microestereoscopia das peças cortadas. (A) amostra de 5 mm; (B) amostra de 4 mm; (C) amostra de 3 mm; e (D) amostra de 2 mm.

Figura 64 – Cedro mara: ensaio com círculos e quadrados.



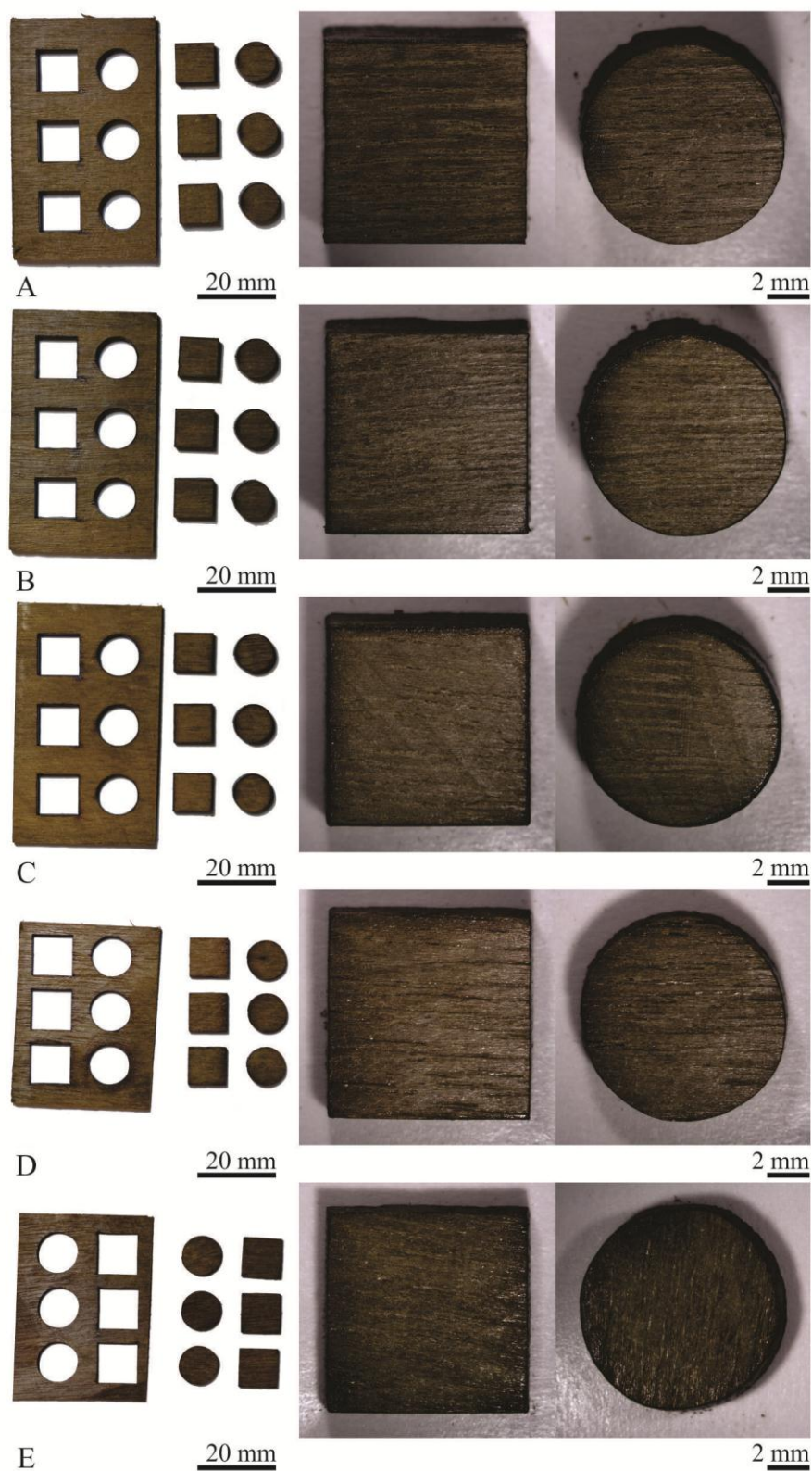
À esquerda, amostras após o ensaio de corte a laser com círculos e quadrados; e à direita, imagens de microestereoscopia das peças cortadas. (A) amostra de 5 mm; (B) amostra de 4 mm; (C) amostra de 3 mm; (D) amostra de 2 mm; e (E) amostra de 1 mm.

Figura 65 – Garapeira: ensaio com círculos e quadrados.



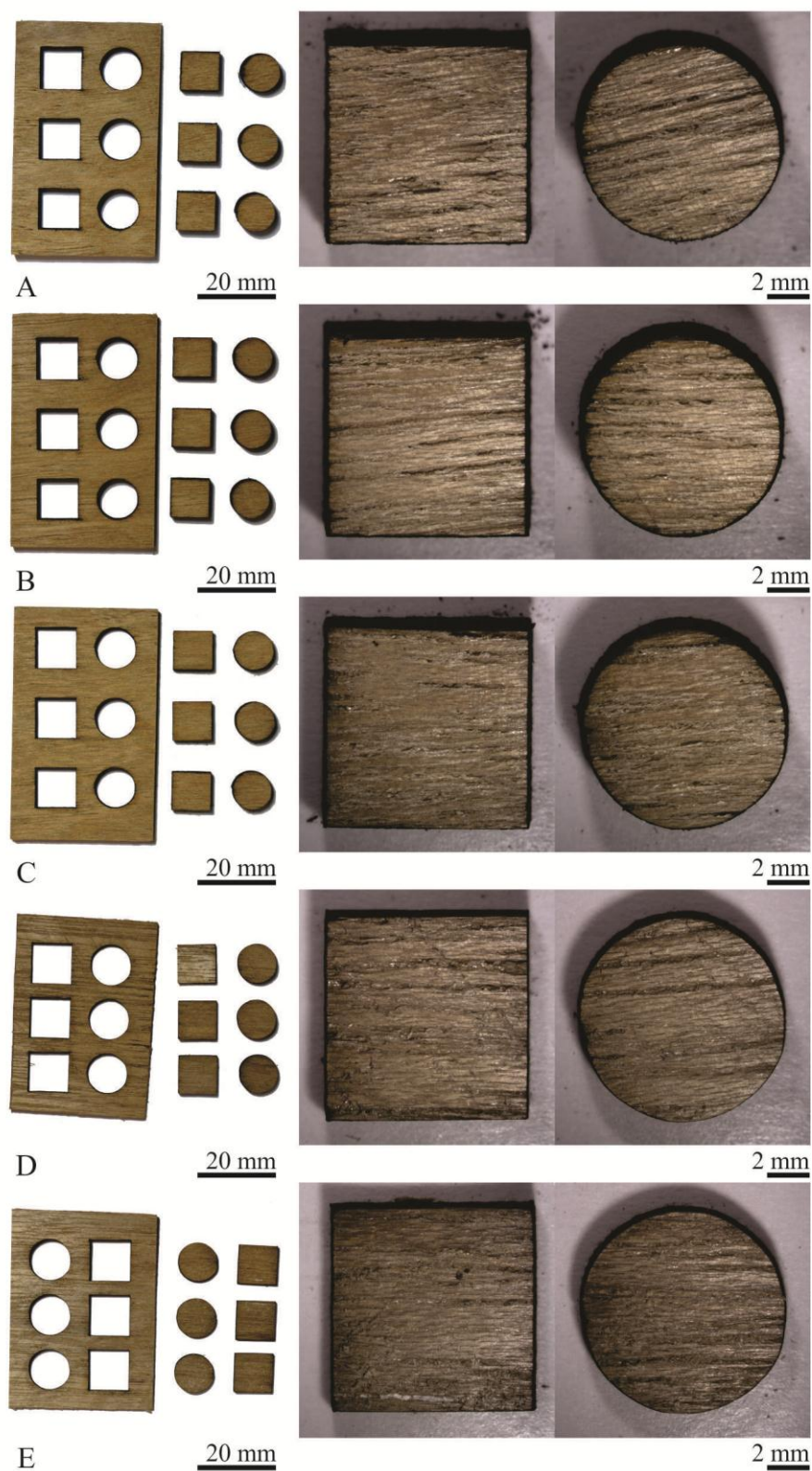
À esquerda, amostras após o ensaio de corte a laser com círculos e quadrados; e à direita, imagens de microestereoscopia das peças cortadas. (A) amostra de 5 mm; (B) amostra de 4 mm; (C) amostra de 3 mm; (D) amostra de 2 mm; e (E) amostra de 1 mm.

Figura 66 – Itaúba: ensaio com círculos e quadrados.



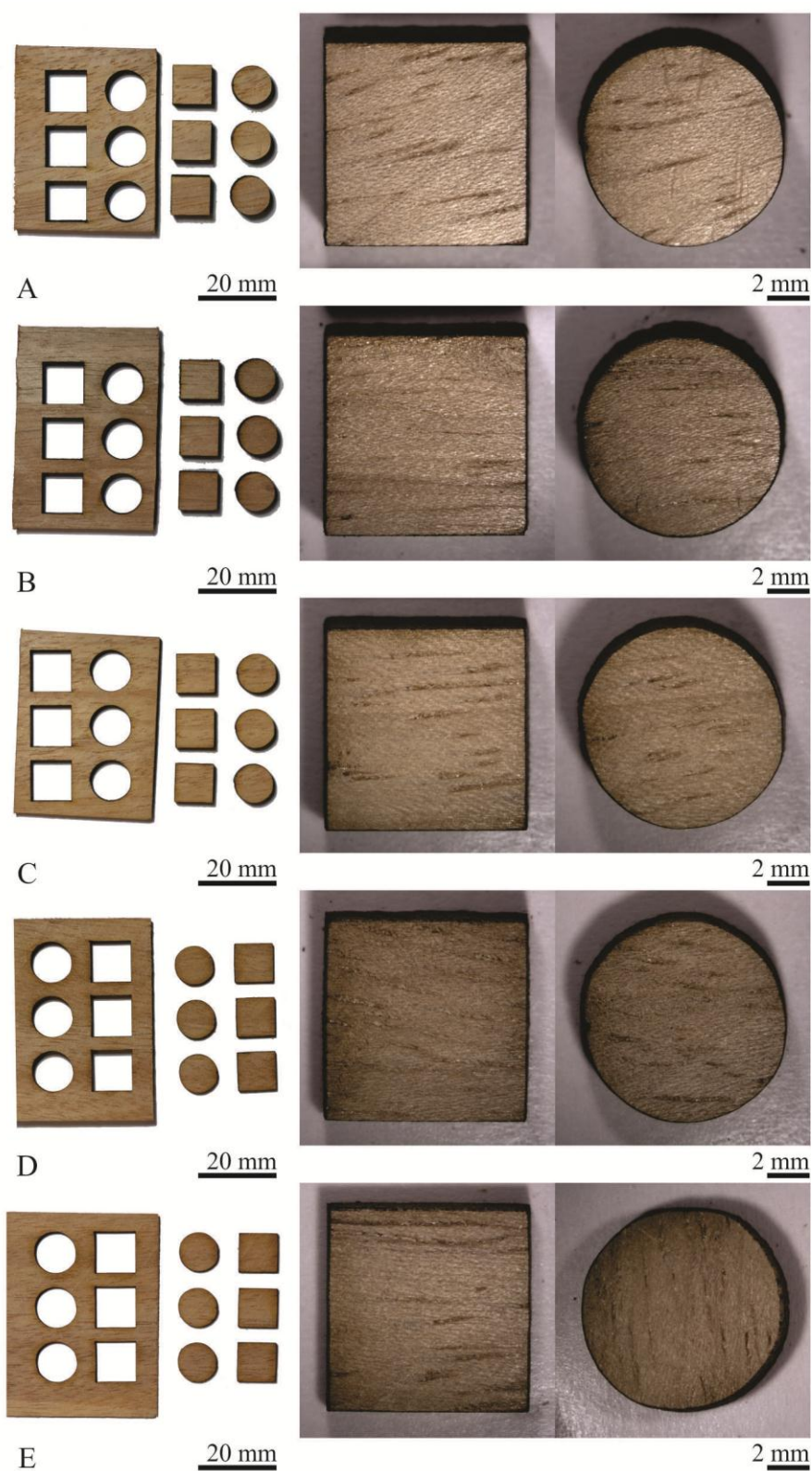
À esquerda, amostras após o ensaio de corte a laser com círculos e quadrados; e à direita, imagens de microestereoscopia das peças cortadas. (A) amostra de 5 mm; (B) amostra de 4 mm; (C) amostra de 3 mm; (D) amostra de 2 mm; e (E) amostra de 1 mm.

Figura 67 – Louro amazonense: ensaio com círculos e quadrados.



À esquerda, amostras após o ensaio de corte a laser com círculos e quadrados; e à direita, imagens de microestereoscopia das peças cortadas. (A) amostra de 5 mm; (B) amostra de 4 mm; (C) amostra de 3 mm; (D) amostra de 2 mm; e (E) amostra de 1 mm.

Figura 68 – Tauari: ensaio com círculos e quadrados.



À esquerda, amostras após o ensaio de corte a laser com círculos e quadrados; e à direita, imagens de microestereoscopia das peças cortadas. (A) amostra de 5 mm; (B) amostra de 4 mm; (C) amostra de 3 mm; (D) amostra de 2 mm; e (E) amostra de 1 mm.

Foram medidos os diâmetros dos círculos e os eixos X e Y dos quadrados executados. A partir das médias destes dados, foi determinada a medida adicional necessária aos desenhos para que o projeto e execução das peças tenham formatos e dimensões idênticas. Esta medida adicional se dá em função do diâmetro do feixe de laser com influência do calor gerado na região, ou seja, do tempo de interação laser-material. É uma compensação análoga à espessura de uma serra que sofre influência de vibração mecânica. A medida adicional foi calculada para cada espécie de madeira e espessura de lâmina (Tabela 15).

Tabela 15 – Medida adicional para as seis espécies de madeira e cinco espessuras de lâmina.

Espessuras	5 mm	4 mm	3 mm	2 mm	1 mm
Espécie	Medida Adicional (mm)	Medida Adicional (mm)	Medida Adicional (mm)	Medida Adicional (mm)	Medida Adicional (mm)
Angelim da mata	0,60	0,55	0,55	0,55	-
Cedro mara	0,55	0,50	0,50	0,55	0,55
Garapeira	0,65	0,55	0,50	0,50	0,60
Itaúba	0,60	0,55	0,55	0,55	0,55
Louro amazonense	0,65	0,60	0,60	0,60	0,60
Tauari	0,60	0,55	0,55	0,55	0,55

Confrontando os resultados acima com as velocidades de corte apresentadas na Tabela 1, foi possível analisar as relações entre as variáveis espessura, velocidade eficaz de corte e medida adicional das seis espécies de madeira.

Para as espécies angelim da mata, itaúba, louro amazonense e tauari, embora, à medida que a espessura das lâminas diminui, a velocidade de corte aumenta, a medida adicional não foi variante. Ela se manteve constante na quase totalidade dos casos, exceto para as lâminas de 5 mm, na qual o maior tempo de interação laser - material ocasionou uma maior perda de material, sendo necessária uma medida adicional também maior. A espécie louro amazonense, na qual a velocidade eficaz de corte é menor do que as demais citadas, apresentou um valor maior de medida adicional.

Para a espécie cedro mara, as espessuras de 1 e 2 mm, de mesma velocidade eficaz de corte, apresentaram a mesma medida adicional, indicando que a quantidade de material no sentido topo-base da amostra, não teve influência sobre a porcentagem de material vaporizado no contorno dos desenhos. Por outro lado, para as espessuras 3 e 4 mm, na qual velocidade eficaz de corte apresentou uma pequena variação (55 e 40 mm/s, respectivamente), e a medida adicional se manteve a mesma, a quantidade de material no sentido topo-base da amostra sugere influência sobre a porcentagem de material vaporizado no contorno dos desenhos.

Já para a espécie garapeira, as medidas adicionais supõem responder principalmente à influência das velocidades eficazes de corte para as espessuras 3, 4 e 5 mm, que variaram de maneira inversamente proporcional (quanto menor a velocidade, maior a medida adicional). Enquanto que para as demais espessuras, a resposta vem principalmente da quantidade de material no sentido topo-base da amostra, também de forma inversamente proporcional (quanto menos material, maior a medida adicional).

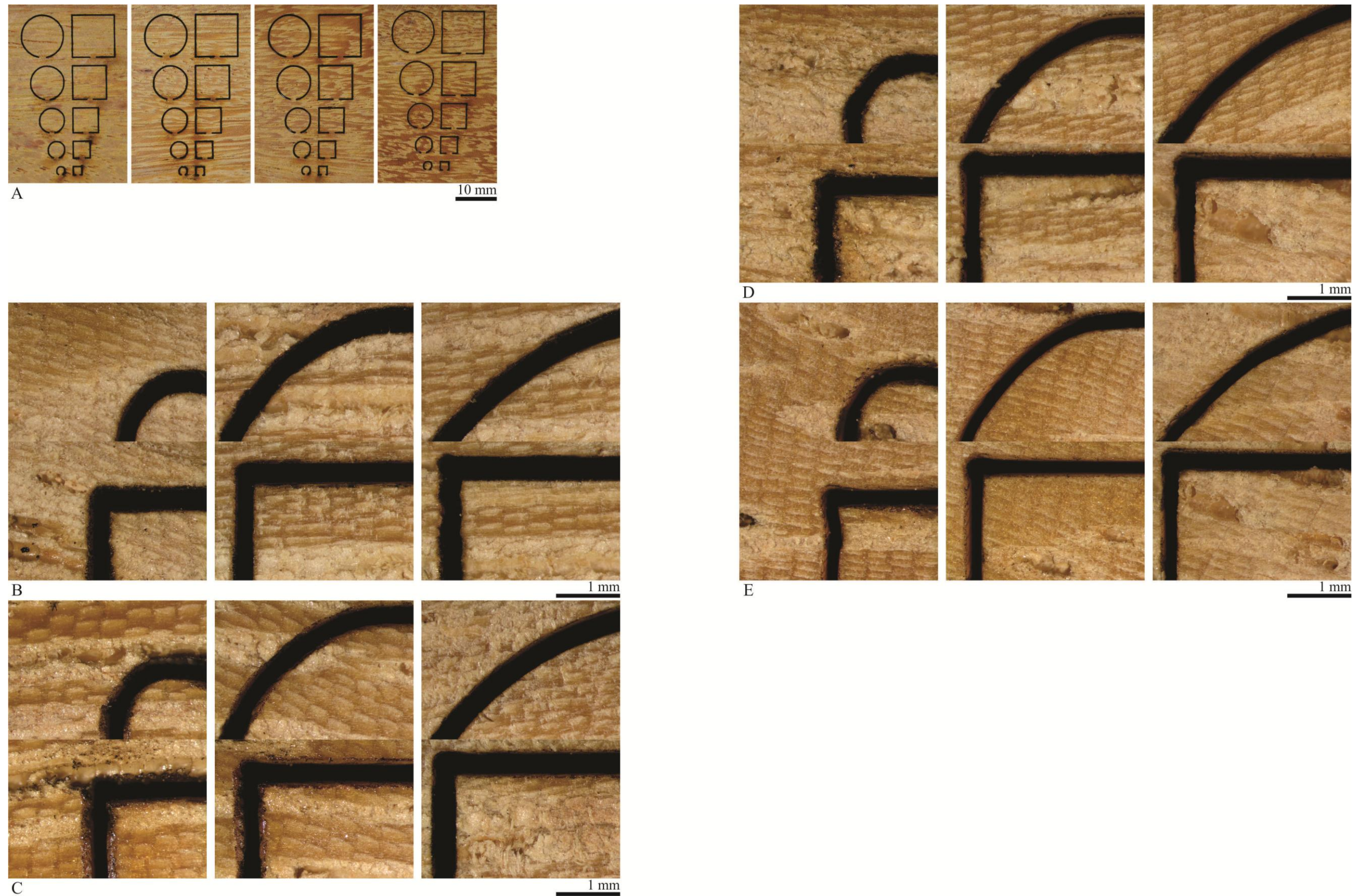
Apesar destas pequenas inconstâncias, a variação geral da medida adicional apresentou um intervalo pequeno entre as espécies de madeira e espessuras de lâminas, sendo este entre 0,50 e 0,65 mm.

4.4.3 Ensaio 03 - Círculos e Quadrados de dimensões variadas

As medidas adicionais obtidas a partir do ensaio anterior se mostraram insuficientes para a realização de projetos no que tange às dimensões de desenho, uma vez que os círculos e quadrados não tiveram as suas dimensões de projeto variadas. A realização do ensaio 03 buscou sanar esta questão, verificando se a dimensão do desenho a ser executado na peça influencia a quantidade de material vaporizado pela ação do laser no contorno deste desenho. Ou seja, se a medida adicional é variante de acordo com as dimensões do desenho. Para tanto, foram executados círculos desenhados com diâmetros de 10 mm, 8 mm, 6 mm, 4 mm e 2 mm e quadrados com seções de 10 x 10 mm, 8 x 8 mm, 6 x 6 mm, 4 x 4 mm e 2 x 2 mm. Assim como no ensaio anterior, este ensaio não foi realizado em amostras de 1 mm da espécie angelim da mata.

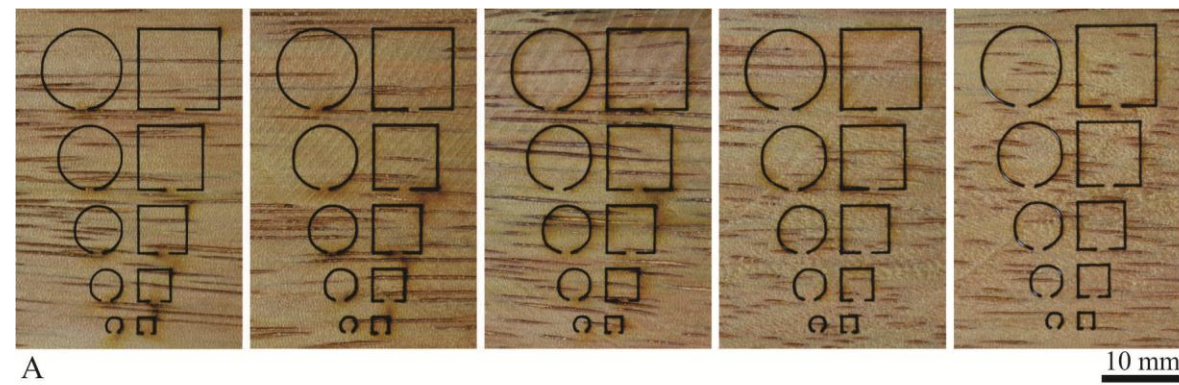
Dos resultados deste ensaio foram feitas imagens de microestereoscopia (Figura 69 à Figura 74) para avaliação do percentual de alteração das dimensões dos desenhos projetados e possível modificação de coloração das amostras pela ação do calor emitido pelo feixe de laser. Para a medição das dimensões foram capturadas 145 imagens com aumentos de 0.7x a 1x, e para verificação da coloração, 290, com aumento de 4x.

Figura 69 – Angelim da mata: Ensaio com círculos e quadrados de dimensões variadas nas amostras de 2 a 5 mm de espessura.

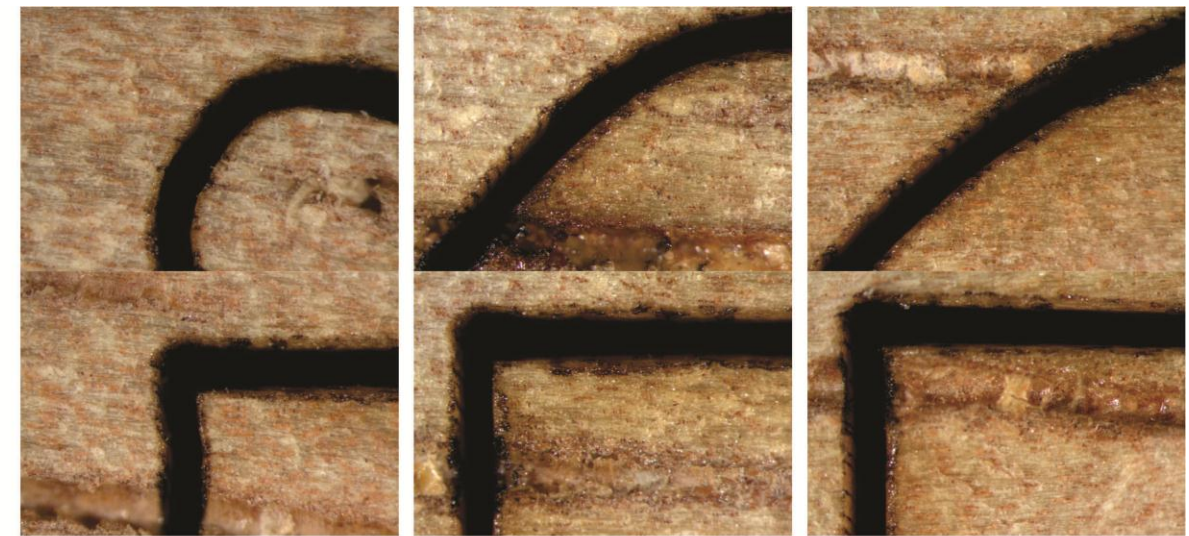


(A) Da esquerda para direita, amostras nas espessuras 5, 4, 3 e 2 mm; (B) Imagens de microestereoscopia das amostras de 5 mm; (C) Imagens de microestereoscopia das amostras de 4 mm; (D) Imagens de microestereoscopia das amostras de 3 mm; (E) Imagens de microestereoscopia das amostras de 2 mm. Da esquerda para direita, formas com 2, 6 e 10 mm; acima círculos e abaixo, quadrados.

Figura 70 – Cedro mara: Ensaio com círculos e quadrados de dimensões variadas nas amostras de 1 a 5 mm de espessura.



A



D



B



E



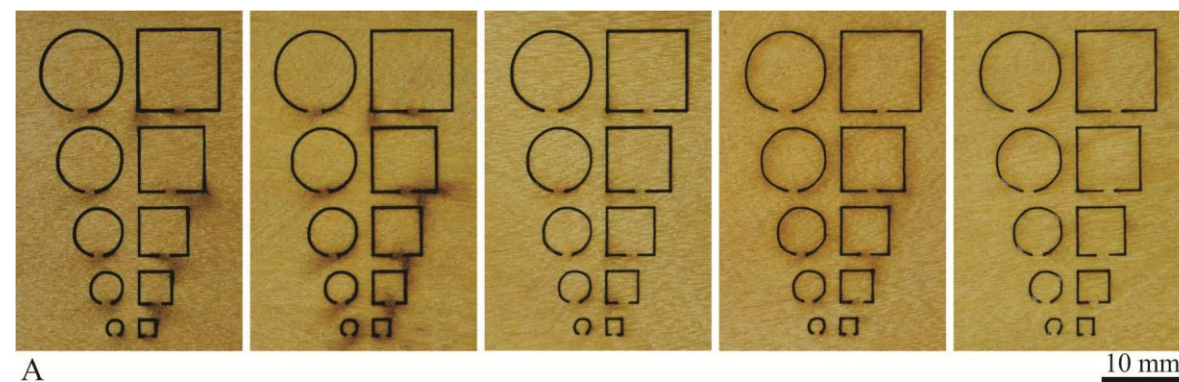
C



F

(A) Da esquerda para direita, amostras nas espessuras 5, 4, 3, 2 e 1 mm; (B) Imagens de microestereoscopia das amostras de 5 mm; (C) Imagens de microestereoscopia das amostras de 4 mm; (D) Imagens de microestereoscopia das amostras de 3 mm; (E) Imagens de microestereoscopia das amostras de 2 mm; (F) Imagens de microestereoscopia das amostras de 1 mm. Da esquerda para direita, formas com 2, 6 e 10 mm; acima círculos e abaixo, quadrados.

Figura 71 – Garapeira: Ensaio com círculos e quadrados de dimensões variadas nas amostras de 1 a 5 mm de espessura.



A



D



B



E



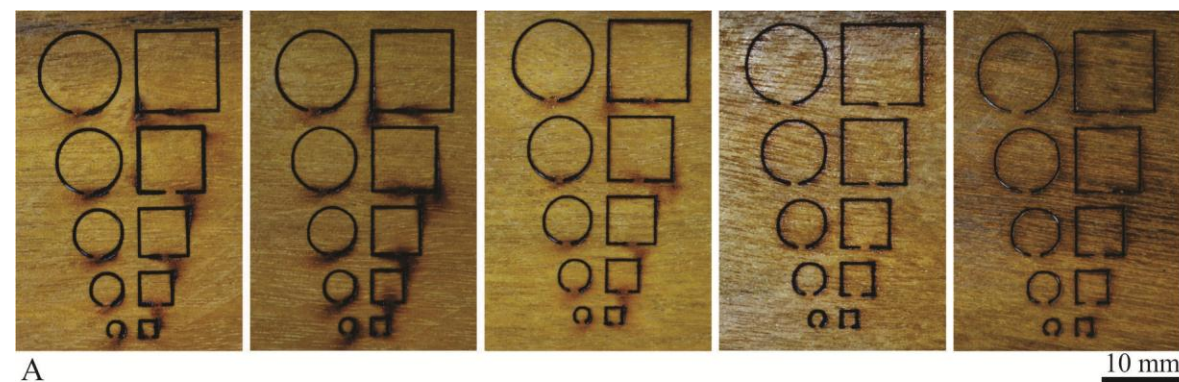
C



F

(A) Da esquerda para direita, amostras nas espessuras 5, 4, 3, 2 e 1 mm; (B) Imagens de microestereoscopia das amostras de 5 mm; (C) Imagens de microestereoscopia das amostras de 4 mm; (D) Imagens de microestereoscopia das amostras de 3 mm; (E) Imagens de microestereoscopia das amostras de 2 mm; (F) Imagens de microestereoscopia das amostras de 1 mm. Da esquerda para direita, formas com 2, 6 e 10 mm; acima círculos e abaixo, quadrados.

Figura 72 – Itaúba: Ensaio com círculos e quadrados de dimensões variadas nas amostras de 1 a 5 mm de espessura.



A



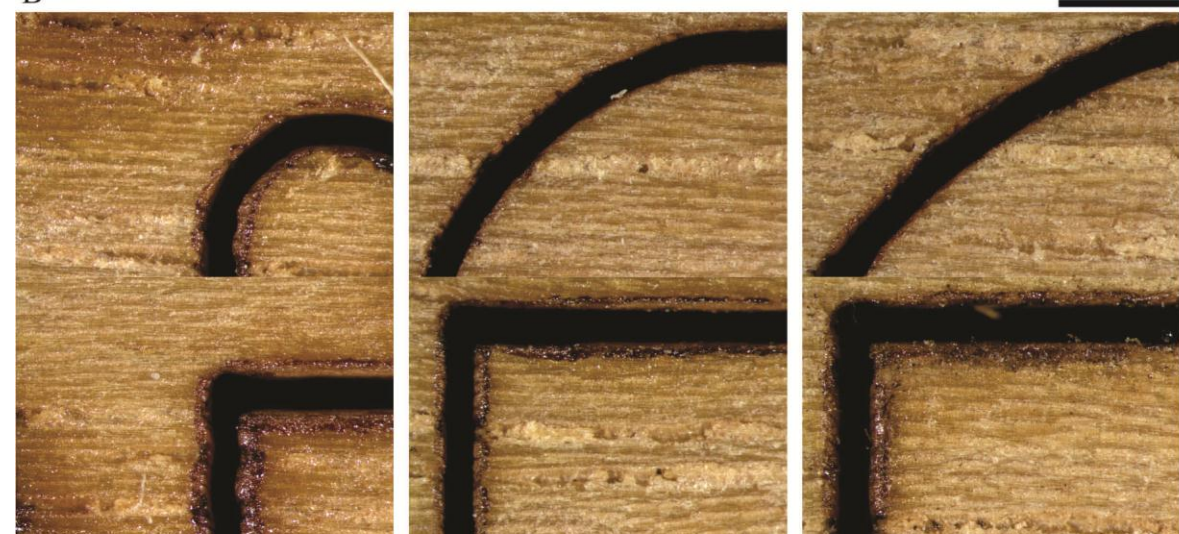
D



B



E



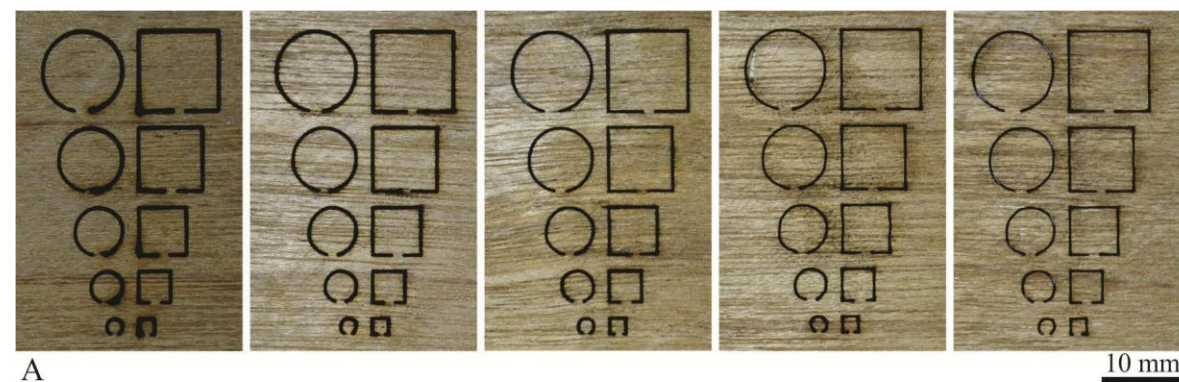
C



F

(A) Da esquerda para direita, amostras nas espessuras 5, 4, 3, 2 e 1 mm; (B) Imagens de microestereoscopia das amostras de 5 mm; (C) Imagens de microestereoscopia das amostras de 4 mm; (D) Imagens de microestereoscopia das amostras de 3 mm; (E) Imagens de microestereoscopia das amostras de 2 mm; (F) Imagens de microestereoscopia das amostras de 1 mm. Da esquerda para direita, formas com 2, 6 e 10 mm; acima círculos e abaixo, quadrados.

Figura 73 – Louro amazonense: Ensaio com círculos e quadrados de dimensões variadas nas amostras de 1 a 5 mm de espessura.



A



D



B



E



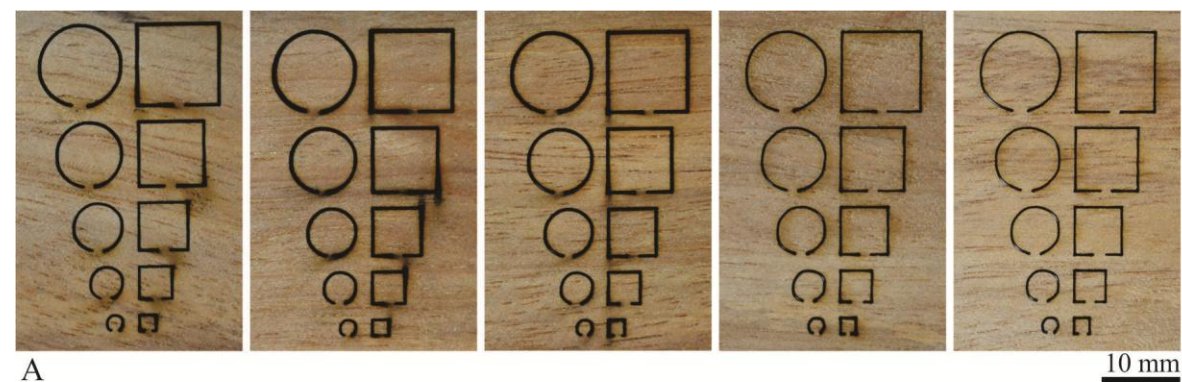
C



F

(A) Da esquerda para direita, amostras nas espessuras 5, 4, 3, 2 e 1 mm; (B) Imagens de microestereoscopia das amostras de 5 mm; (C) Imagens de microestereoscopia das amostras de 4 mm; (D) Imagens de microestereoscopia das amostras de 3 mm; (E) Imagens de microestereoscopia das amostras de 2 mm; (F) Imagens de microestereoscopia das amostras de 1 mm. Da esquerda para direita, formas com 2, 6 e 10 mm; acima círculos e abaixo, quadrados.

Figura 74 – Tauari: Ensaio com círculos e quadrados de dimensões variadas nas amostras de 1 a 5 mm de espessura.



A



D



B



E



C



F

(A) Da esquerda para direita, amostras nas espessuras 5, 4, 3, 2 e 1 mm; (B) Imagens de microestereoscopia das amostras de 5 mm; (C) Imagens de microestereoscopia das amostras de 4 mm; (D) Imagens de microestereoscopia das amostras de 3 mm; (E) Imagens de microestereoscopia das amostras de 2 mm; (F) Imagens de microestereoscopia das amostras de 1 mm. Da esquerda para direita, formas com 2, 6 e 10 mm; acima círculos e abaixo, quadrados.

Foram medidos os diâmetros dos círculos e os eixos X e Y dos quadrados executados. A partir das médias destes dados, foi determinada a medida adicional necessária aos desenhos para que o projeto e execução das peças apresentem formatos e dimensões idênticas. A medida adicional foi calculada para cada espécie de madeira, espessura de lâmina e dimensão dos círculos e quadrados (Figura 75 a Figura 80).

Figura 75 – Angelim da mata: gráfico representando a medida adicional para as cinco espessuras de lâmina.

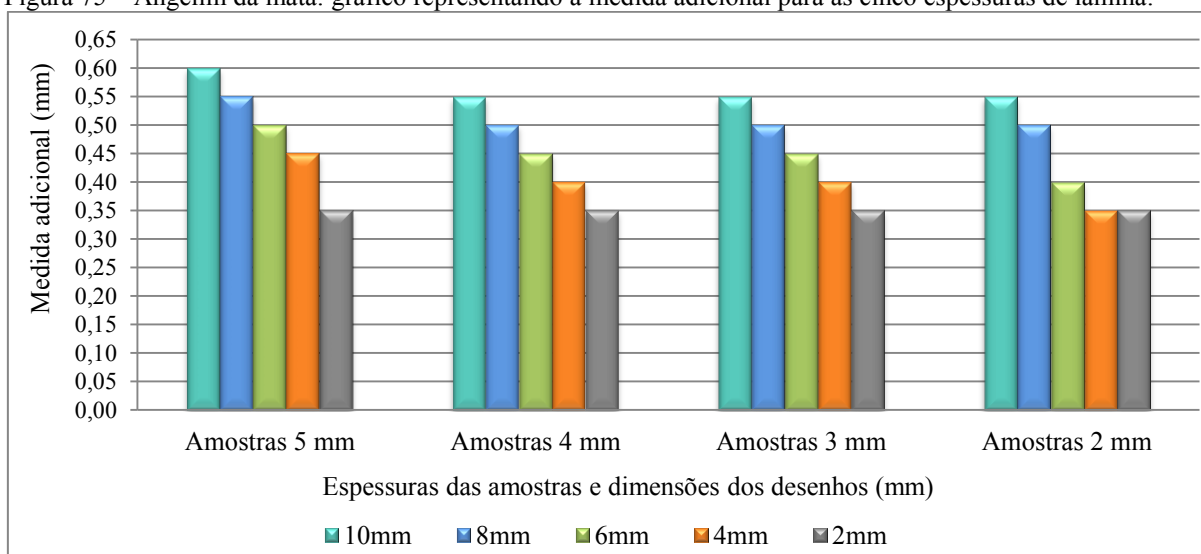


Figura 76 – Cedro mara: gráfico representando a medida adicional para as cinco espessuras de lâmina.

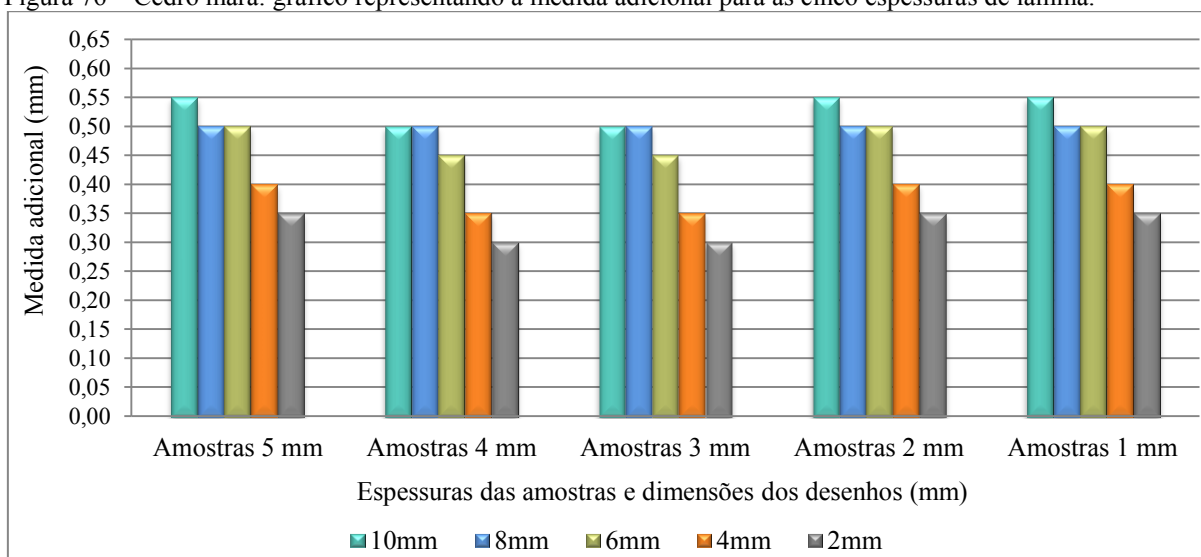


Figura 77 – Garapeira: gráfico representando a medida adicional para as cinco espessuras de lâmina.

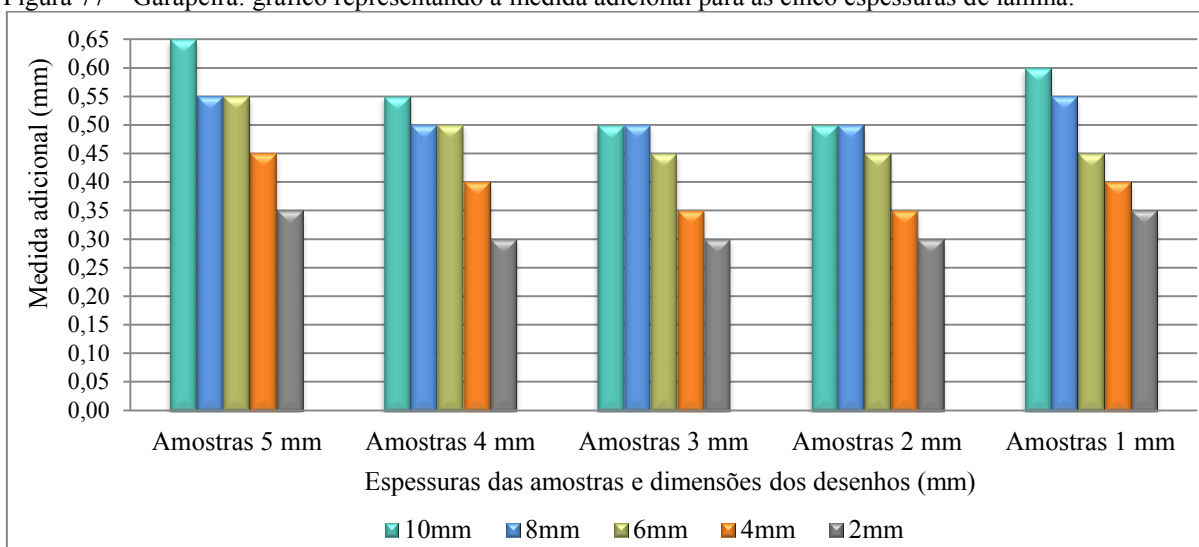


Figura 78 – Itaúba: gráfico representando a medida adicional para as cinco espessuras de lâmina.

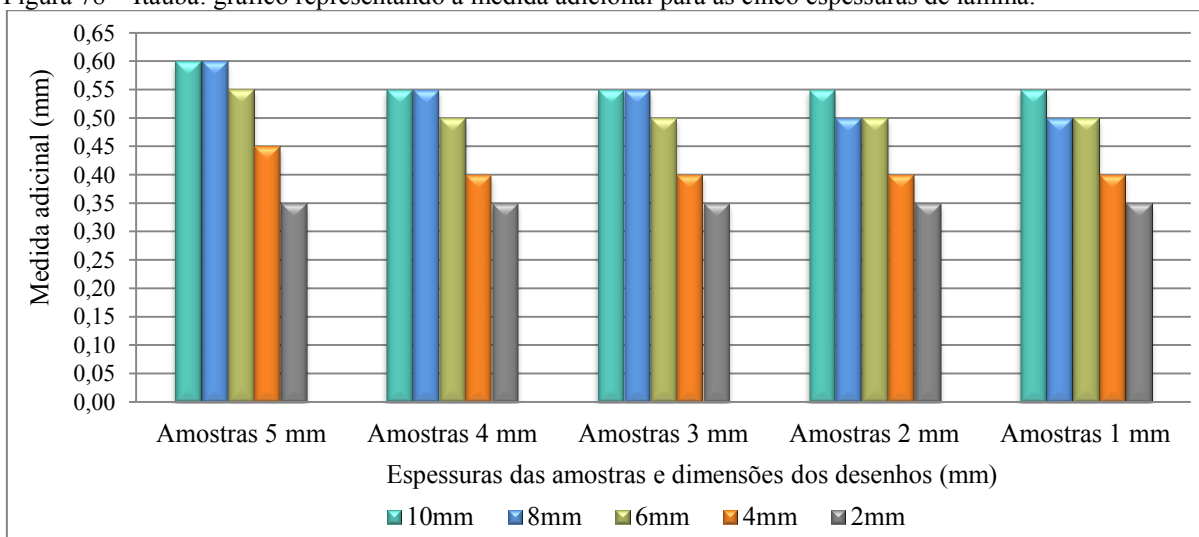


Figura 79 – Louro amazonense: gráfico representando a medida adicional para as cinco espessuras de lâmina.

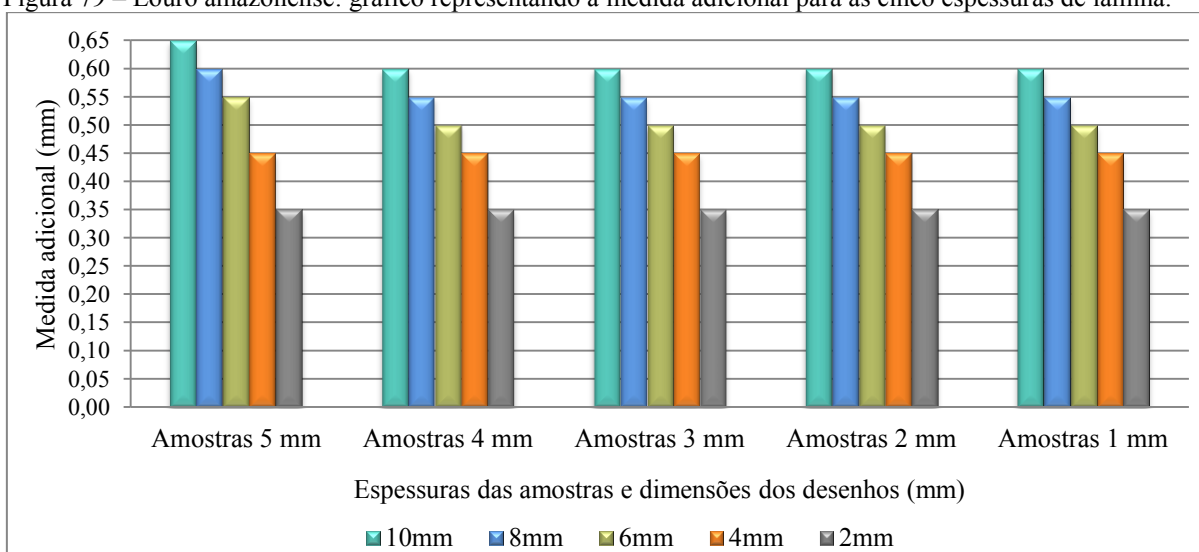
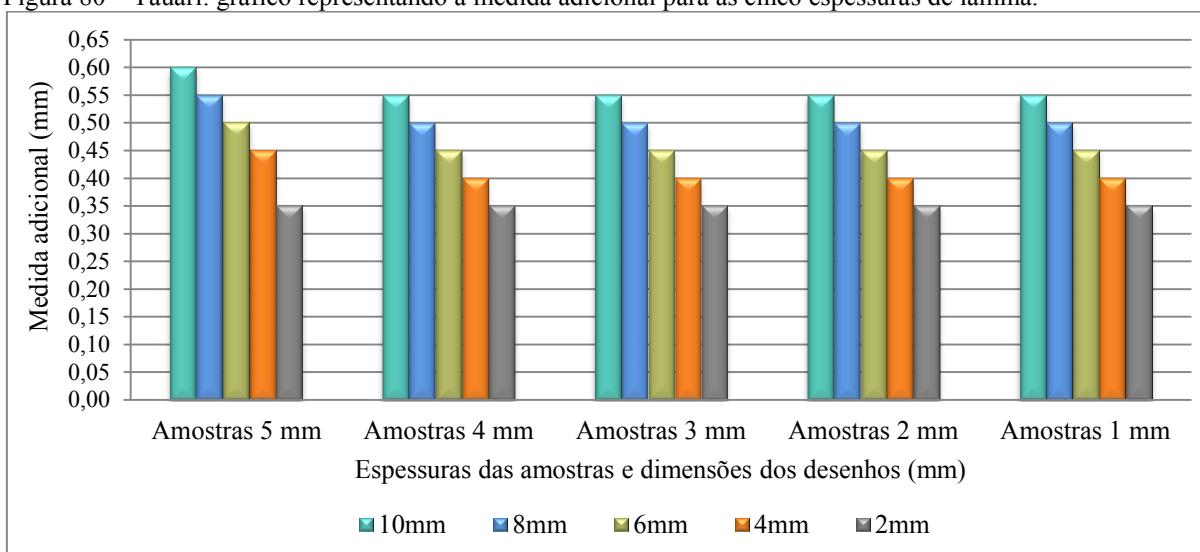


Figura 80 – Tauari: gráfico representando a medida adicional para as cinco espessuras de lâmina.



Por meio destes resultados, é possível afirmar que quanto menor o desenho, menor a medida adicional necessária. Seguindo a ordem decrescente dos tamanhos dos círculos e quadrados, foi verificado que a medida adicional diminui, entre um tamanho testado e outro, variando entre 0,10 e 0,05 mm.

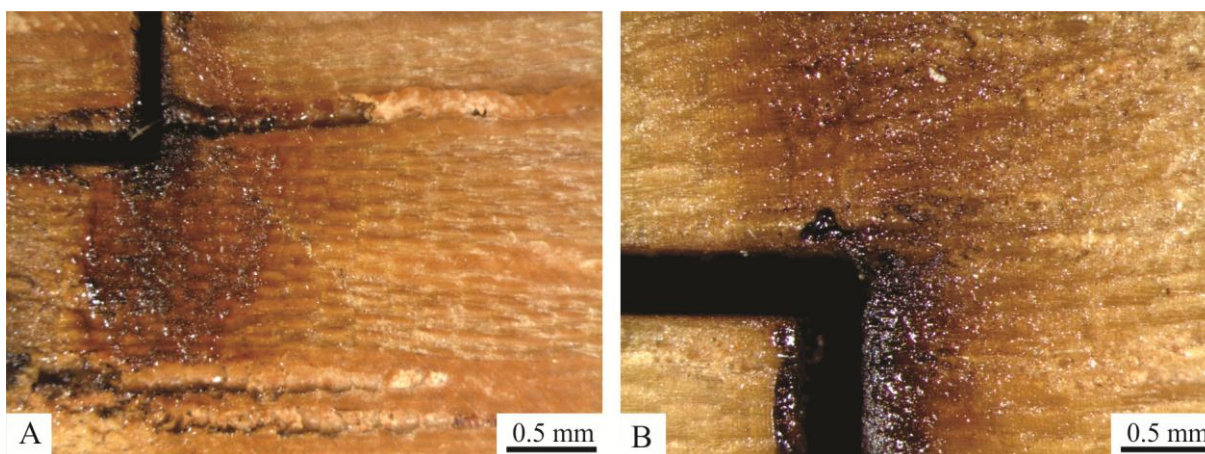
A diminuição da medida adicional variante de acordo com a redução da dimensão do desenho pode ser devido ao fato do feixe de laser não percorrer a distância necessária para atingir a velocidade estipulada como parâmetro. E, como já discutido com base em resultados anteriores, sendo a aceleração inicial maior do que a constante, a velocidade real acaba por ser maior do que a estipulada, uma vez que o tempo de interação entre o laser e o material é menor, a quantidade de material vaporizado também o é.

Outro ponto verificado com o ensaio 03 foi a formação de zonas afetadas pelo calor, passíveis de análise pela alteração ou não da coloração das madeiras. Da mesma forma que a menor velocidade eficaz de corte gera a necessidade de uma maior medida adicional devido à maior remoção de material durante o processo de queima e vaporização pela ação do laser, a alteração na coloração também é mais evidente. Quanto menor a velocidade, maior o tempo de interação laser-material, e maior a zona de influência do laser sobre o material.

Para todas as espécies, quanto maior a espessura das lâminas, menor a velocidade de corte, e maior a zona afetada pelo calor, o que ocasiona mudanças na coloração da madeira. Para as espessuras menores, as velocidades foram maiores, gerando uma alteração menor na coloração das mesmas. Por outro lado, as maiores velocidades, por vezes geraram certa irregularidade no contorno das arestas.

Ainda que por vezes visível, a alteração da coloração na face superior das amostras foi ínfima para a maioria das espécies. Dentre elas, a que mais demonstrou suscetibilidade à queima aparente foi a louro amazonense. As espécies angelim da mata e itaúba apresentaram partes mais propensas à queima e alteração na coloração do que outras (Figura 81), provavelmente pela variação na sua composição química.

Figura 81 – Zonas afetadas pelo calor com alteração na coloração da madeira.



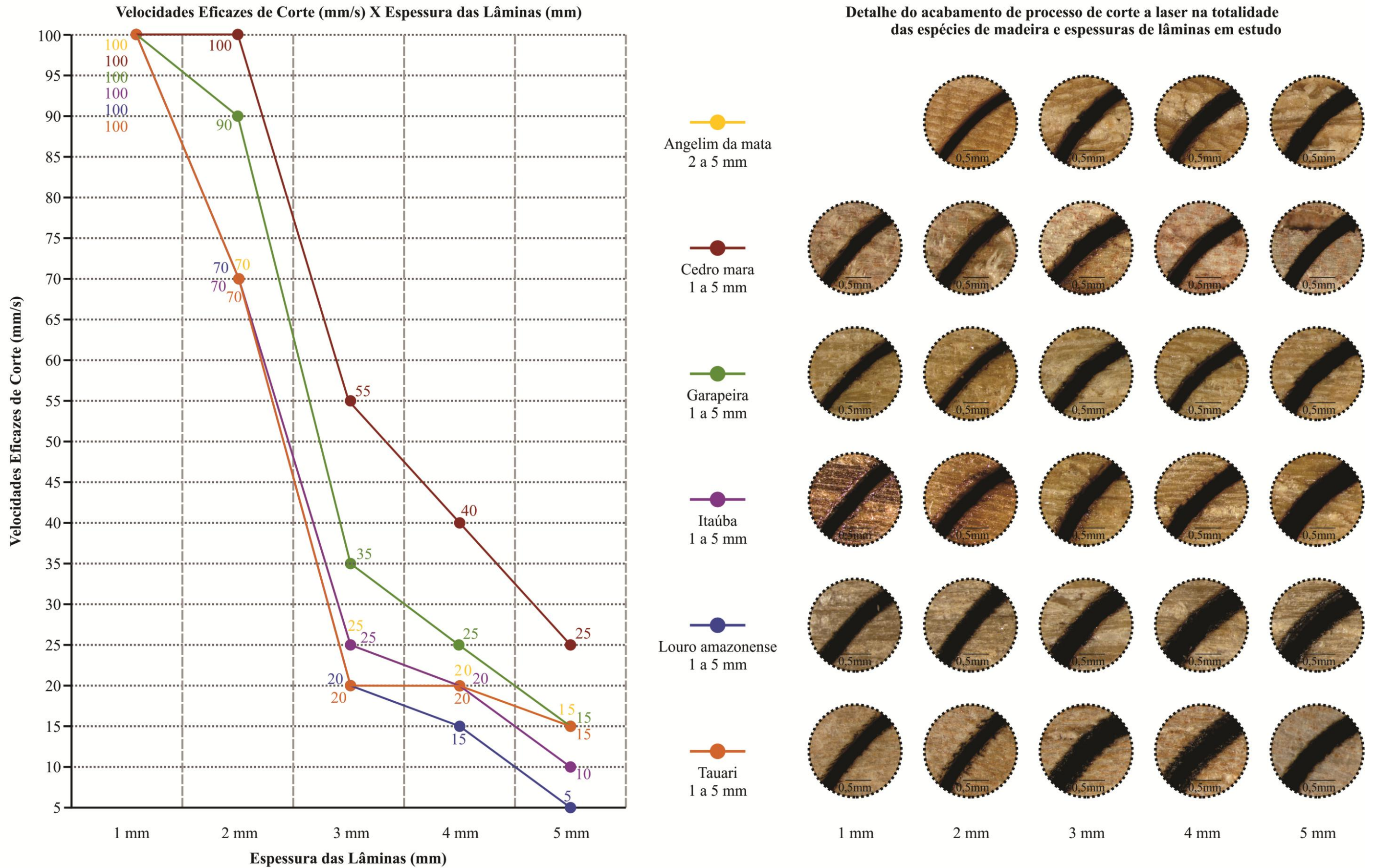
(A) Amostra de 5 mm - Angelim da mata; (B) Amostra de 5 mm – Itaúba.

Por fim, também foi possível notar que os inícios e finais da execução dos contornos dos desenhos ocasionaram a queima do material e alteração de cor na porção superior das amostras. O feixe inicial do laser é o mais prejudicial no comprometimento das características de coloração.

4.5 Relação entre as propriedades da madeira e os parâmetros do corte a laser

É preciso o conhecimento do material de trabalho para o entendimento e aplicação de qualquer que seja o processo de produção utilizado na geração de objetos. Para tanto, foram relacionadas as propriedades das madeiras estudadas e os parâmetros de corte a laser definidos pelos ensaios. A seguir são apresentados os dados referentes aos resultados obtidos a partir da caracterização do material e do processo de corte a laser.

Figura 82 – Gráfico representativo das velocidades eficazes de corte, medidas em mm/s, das seis espécies de madeira nas cinco espessuras de lâminas e imagens dos detalhes do padrão de acabamento dos cortes efetuados.



Por meio dos dados ilustrados no gráfico da Figura 82 é possível verificar que, para todas as espécies, as velocidades eficazes de corte das lâminas são inversamente proporcionais às espessuras das mesmas. Ou seja, quanto maior a espessura das lâminas, menor a velocidade eficaz de corte, significando a necessidade de maior tempo de interação laser-material para que haja o rompimento completo da lâmina. Porém, há de se salientar que esta não é uma relação linear, onde a linha representativa de cada espécie manteria uma inclinação constante.

Confrontando os dados aqui apresentados (Figura 82) com as propriedades de densidade aparente e básica de cada espécie (Tabela 5 e Tabela 8), constata-se que para maiores densidades são necessárias menores velocidades, ou seja, maior tempo de ação do laser sobre a peça de madeira.

Sendo o contrário também verdadeiro, a espécie cedro mara, com densidade aparente e básica de, respectivamente, 542,9 kg/m³ e 470,2 kg/m³, é a espécie menos densa e que requer menor tempo de interação laser-material, possibilitando, portanto, velocidades maiores para o corte efetivo das lâminas.

As espécies angelim da mata, itaúba, tauari, que possuem densidades aparente e básica com valores similares, têm comportamentos semelhantes em relação ao processo de corte a laser. Para estas, foram determinadas velocidades eficazes de corte de mesmo valor para a maioria das espessuras estudadas. A espécie louro amazonense também apresentou velocidades de corte semelhante para as espessuras de lâmina de 1, 2 e 3 mm.

Comparando as espécies angelim da mata e itaúba, a primeira possui valores de densidade menores, logo seriam esperadas maiores velocidades eficazes de corte. No entanto, as duas evidenciaram comportamentos parecidos, possivelmente devido a compostos inorgânicos ricos em cálcio (Ca) encontrados nas amostras analisadas da espécie angelim da mata. A ocorrência e distribuição destas fases minerais, na estrutura da madeira, pode influenciar no processo de corte a laser.

Para o louro amazonense, de alta densidade aparente e básica, foram necessárias velocidades mais baixas para que o corte das lâminas nas espessuras de 4 e 5 mm fosse completo, ou seja, do topo à base da amostra, ratificando a relação inversamente proporcional entre densidade e velocidade eficaz de corte. Este padrão de comportamento, por outro lado, não foi seguido pela espécie garapeira. Esta, apesar de apresentar alta densidade, foi a espécie, depois do cedro mara, que necessitou menor tempo de interação laser-material, e, portanto maiores velocidades de corte.

Pode se concluir também que à medida que as espessuras das lâminas diminuem, as espécies tendem a demonstrar o mesmo comportamento em relação ao processo de corte a laser ainda que apresentem valores de densidades diferentes. Para as menores espessuras de lâminas estudadas, os valores das velocidades eficazes de corte se assemelham, ou mesmo, se igualam.

Em relação à propriedade de estabilidade dimensional da madeira, foi verificado que as deformações de retração e inchamento para a totalidade das espécies ocorreu em ordem crescente para as direções longitudinal, radial e tangencial, como apontado pela literatura. Para a direção longitudinal, as deformações não foram significativas, variando entre 0,26 e 1,15%. Para a direção radial, os valores das deformações variaram entre 2,04 e 6,92%. E para a direção tangencial, os valores foram maiores, com variação de 3,89 a 12,58%, dependendo da espécie de madeira. Não foi possível a correlação entre esta propriedade e a precisão de corte das peças. A medida adicional necessária aos desenhos de projeto não teve variação significativa entre as espécies, impossibilitando a comparação entre propriedade do material e processo de produção no que tange à precisão de corte e encaixe das peças.

5 APLICAÇÃO DO PROCESSO A LASER NA MARCHETARIA

Para a verificação da aplicabilidade dos parâmetros estudados em painéis de marchetaria, foram escolhidos cinco padrões geométricos do artista gráfico Maurits Cornelis Escher. O referido artista trabalha com a repetição de padrões que preenchem uma superfície pelo intertravamento de um elemento em outro sucessivamente, de maneira que o perímetro de uma peça é também o contorno de sua peça adjacente. Suas regras para a criação de composições são o uso de figuras reconhecíveis e de cores contrastantes entre as peças. As tonalidades contrastantes permitem a visualização e identificação do padrão geométrico utilizado pelo artista. Para ele, sem contraste, não há visibilidade, e sem reconhecibilidade não há sentido (SCHATTSCHNEIDER, 1990).

Os trabalhos do artista eleitos para a investigação da aplicabilidade deste estudo são desenvolvidos com um único padrão geométrico, que se repete gerando uma superfície totalmente preenchida. A escolha destes trabalhos está pautada na agilidade da verificação dos parâmetros determinados pelos ensaios 01, 02 e 03, uma vez que é preciso a elaboração de um único desenho para a execução das peças. Além disso, o artista trabalha com padrões geométricos de grande complexidade, importantes de serem testados a fim de validar os parâmetros do processo de corte a laser definidos nesta pesquisa para as diferentes espécies de madeira.

A variedade de cores e texturas das diferentes espécies vai ao encontro a uma das regras de composição do artista citadas anteriormente, tonalidades contrastantes entre peças adjacentes são necessárias para a visualização do padrão utilizado. Concomitantemente, a nobreza da madeira é valorizada em suas características estéticas pela evidência deste contraste, ponto comum à marchetaria e necessário para agregar valor aos rejeitos.

Foram escolhidos cinco padrões geométricos de complexidade variável. Um para cada espessura de lâmina estudada. O grau de complexidade variou de forma crescente das lâminas de 5 mm para as de 1 mm. Para as lâminas de 1 mm, foi escolhido o cavalo marinho (Figura 83A), para as de 2 mm, a libélula (Figura 83B), para as de 3 mm, o esquilo (Figura 83C), para as de 4 mm, o lagarto (Figura 83D), e para as de 5 mm, a borboleta (Figura 83E).

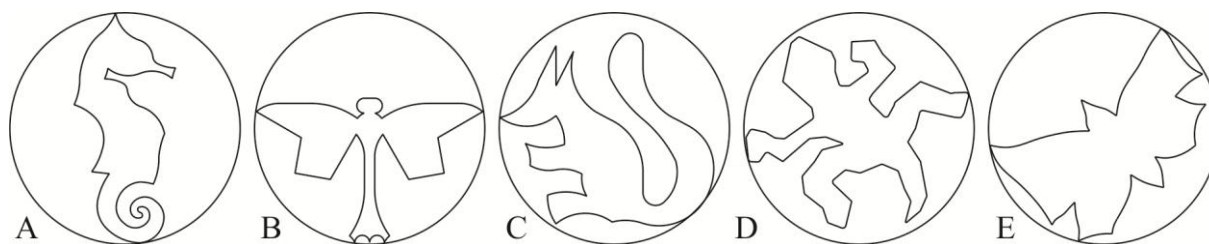
Figura 83 – Gravuras com padrões geométricos desenvolvidos pelo artista M. C. Escher.



Cavalo marinho; (B) Libélula; (C) Esquilo; (D) Lagarto; e (E) Borboleta.
 Fonte: Adaptado de Schattschneider, 1990.

O primeiro passo foi refazer estes padrões, transpondo-os para arquivos com extensão .dxf, elaborados no *software* AutoCAD® versão 2012. A fim de assegurar a variação do grau de complexidade dos cinco padrões, os desenhos foram elaborados com dimensões gerais aproximadas. E, sendo eles, diferentes entre si, para essa padronização de dimensões, foram todos inseridos em um círculo de 40 mm de diâmetro (Figura 84).

Figura 84 – Padrões geométricos inseridos em um círculo de 40 mm de diâmetro.



Cavalinho marinho; (B) Libélula; (C) Esquilo; (D) Lagarto; e (E) Borboleta.

Para cada espécie de madeira e padrão geométrico estipulado para cada espessura de lâmina, foi acrescentada ao desenho a medida adicional necessária, determinada a partir dos ensaios anteriores. Como visto, a medida adicional é variável de acordo com a dimensão do desenho a ser executado. Em se tratando de desenhos formados de retas e curvas de dimensões variadas, optou-se pelo acréscimo da menor medida adicional determinada para cada espécie e espessura de lâmina. Conforme se verifica na Figura 75 a Figura 80, a menor medida adicional é variável, entre as espécies e espessuras de lâminas, de 0,30 a 0,35 mm. Assim, foi adotada a compensação de 0,30mm para a totalidade dos desenhos.

Caso esta medida adicional estipulada seja insuficiente, a peça ficará menor do que o desenho de projeto, sendo possível o preenchimento dos vazios entre peças adjacentes. Se, por outro lado, fosse utilizada a maior medida adicional encontrada com os ensaios anteriores, a peça poderia ficar maior do que no projeto, impossibilitando o encaixe entre as peças.

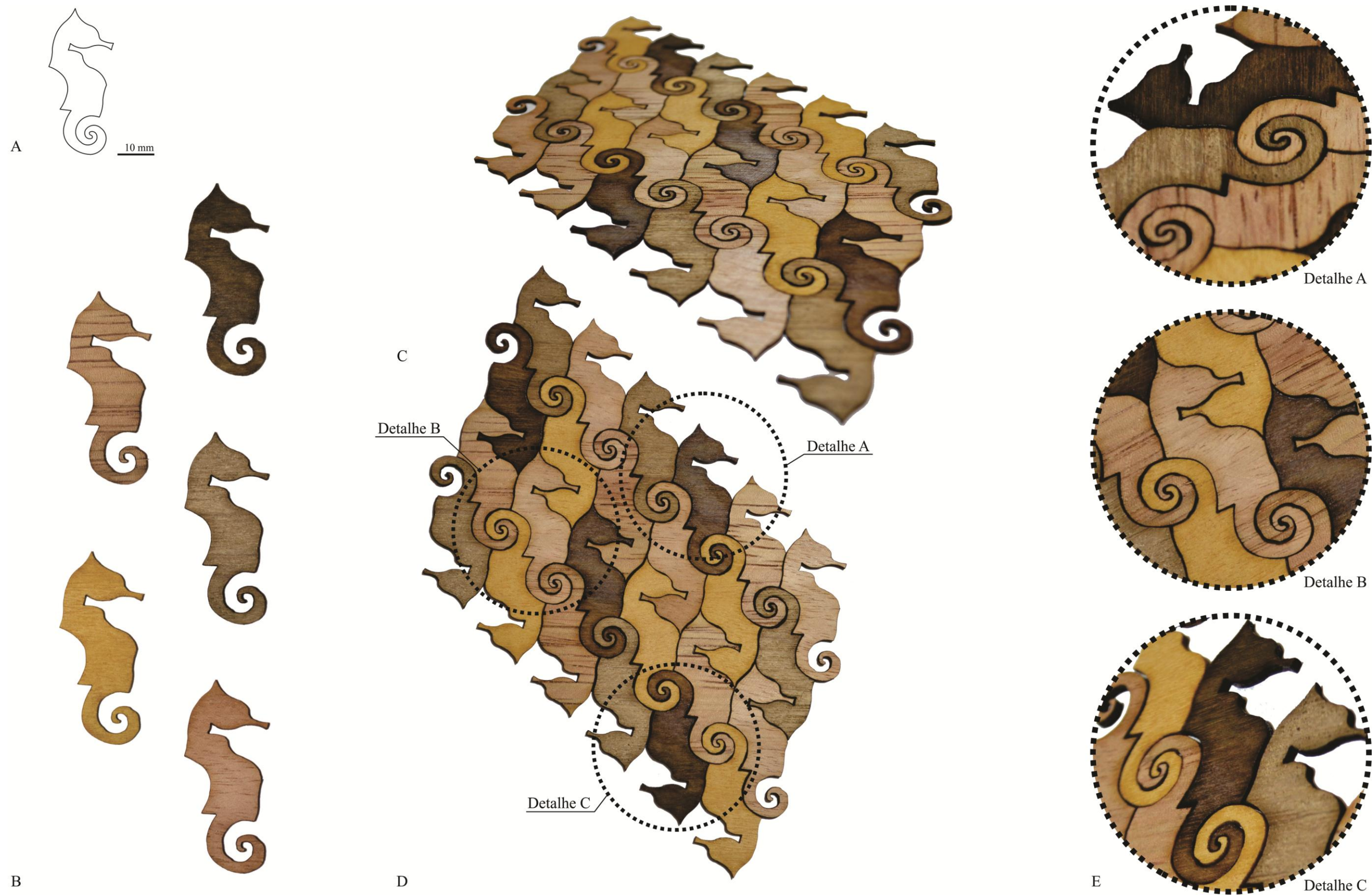
Para o processo de corte a laser, no *software* do equipamento Automatisa®, modelo Assia, foi utilizada a programação dos seguintes parâmetros: potência entre 66,5 W e 70 W (95 e 100%), aceleração de 1.000 mm/s², e pressão do jato de ar para refrigeração de 1 bar. As velocidades de corte foram definidas baseadas nos ensaios sistemáticos realizados e já neste estudo apresentados para cada espécie e espessura de lâmina conforme a Tabela 1 rerepresentada abaixo:

Tabela 1 – Velocidades de corte, medidas em mm/s, utilizadas para cada espécie e espessura.

Espécies	Amostras de 1 mm	Amostras de 2 mm	Amostras de 3 mm	Amostras de 4 mm	Amostras de 5 mm
angelim da mata	100	70	25	20	15
cedro mara	100	100	55	40	25
garapeira	100	90	35	25	15
itaúba	100	70	25	20	10
louro amazonense	100	70	20	15	5
tauari	100	70	20	20	15

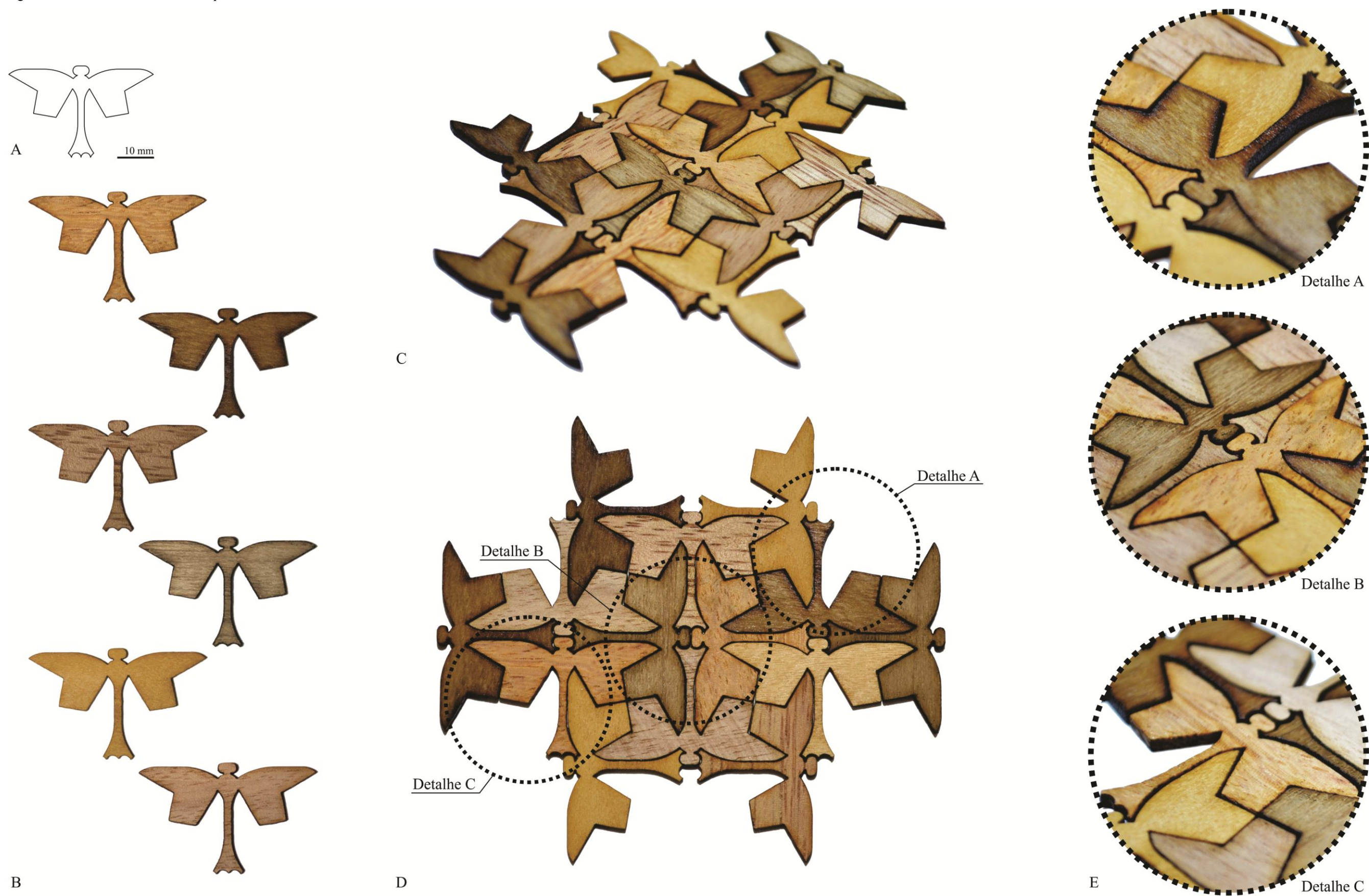
Para a continuidade do processo, foi feito o ajuste da distância focal, adequando a altura da mesa de trabalho para que todas as peças fossem posicionadas de modo a sua face superior distar 3 mm do bocal de corte. Tendo ajustado todos os parâmetros estudados, as peças foram cortadas, e depois montados os painéis marchetados dos padrões testados para cada espessura de lâmina (Figura 85 a Figura 89).

Figura 85 – Painel marchetado com o padrão cavalo marinho executado com lâminas de 1 mm.



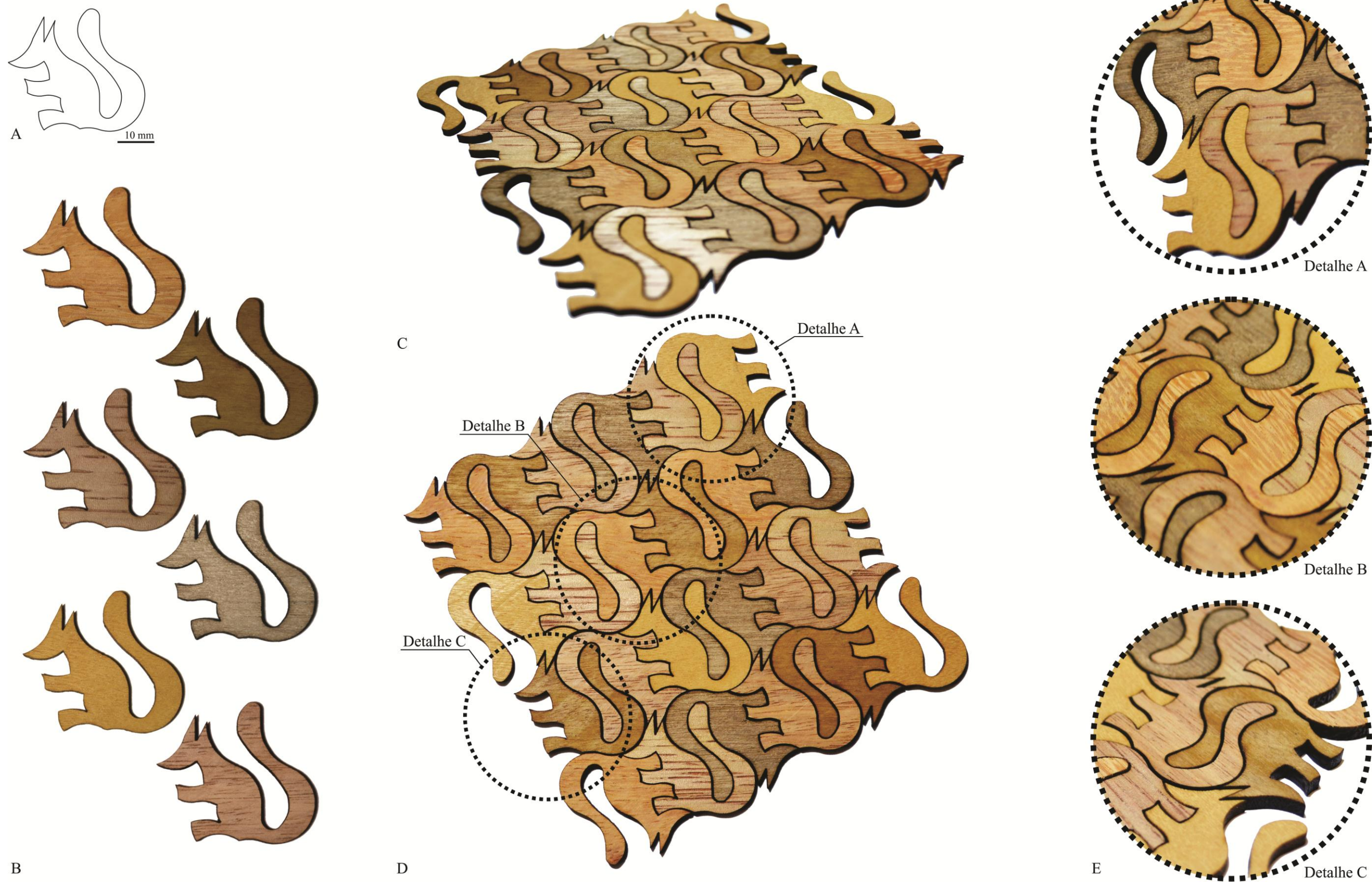
(A) Padrão cavalo marinho; (B) Peças cortadas das diferentes espécies: de cima para baixo, coluna da esquerda – cedro mara e garapeira – e coluna da direita – itaúba, louro amazonense e tauari; (C) Painel marchetado com 24 peças; (D) Vista superior do painel marchetado com demarcações das áreas dos detalhes A, B e C; (E) Detalhes A, B e C do painel marchetado.

Figura 86 – Painel marchetado com o padrão libélula executado com lâminas de 2 mm.



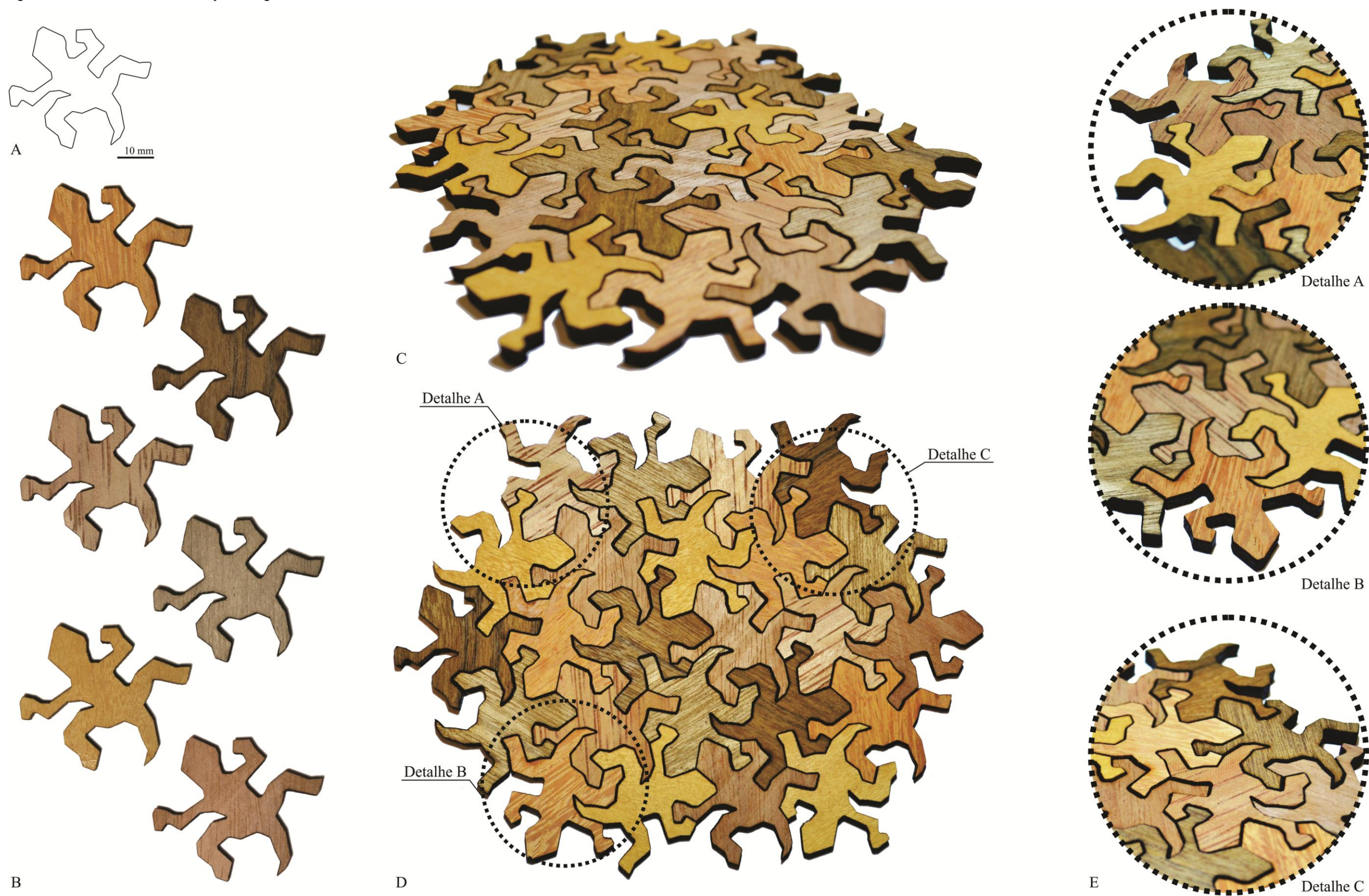
(A) Padrão libélula; (B) Peças cortadas das diferentes espécies: de cima para baixo, coluna da esquerda – angelim da mata, cedro mara e garapeira – e coluna da direita – itaúba, louro amazonense e tauari; (C) Painel marchetado com 14 peças; (D) Vista superior do painel marchetado com demarcações das áreas dos detalhes A, B e C; (E) Detalhes A, B e C do painel marchetado.

Figura 87 – Painel marchetado com o padrão esquilo executado com lâminas de 3 mm.



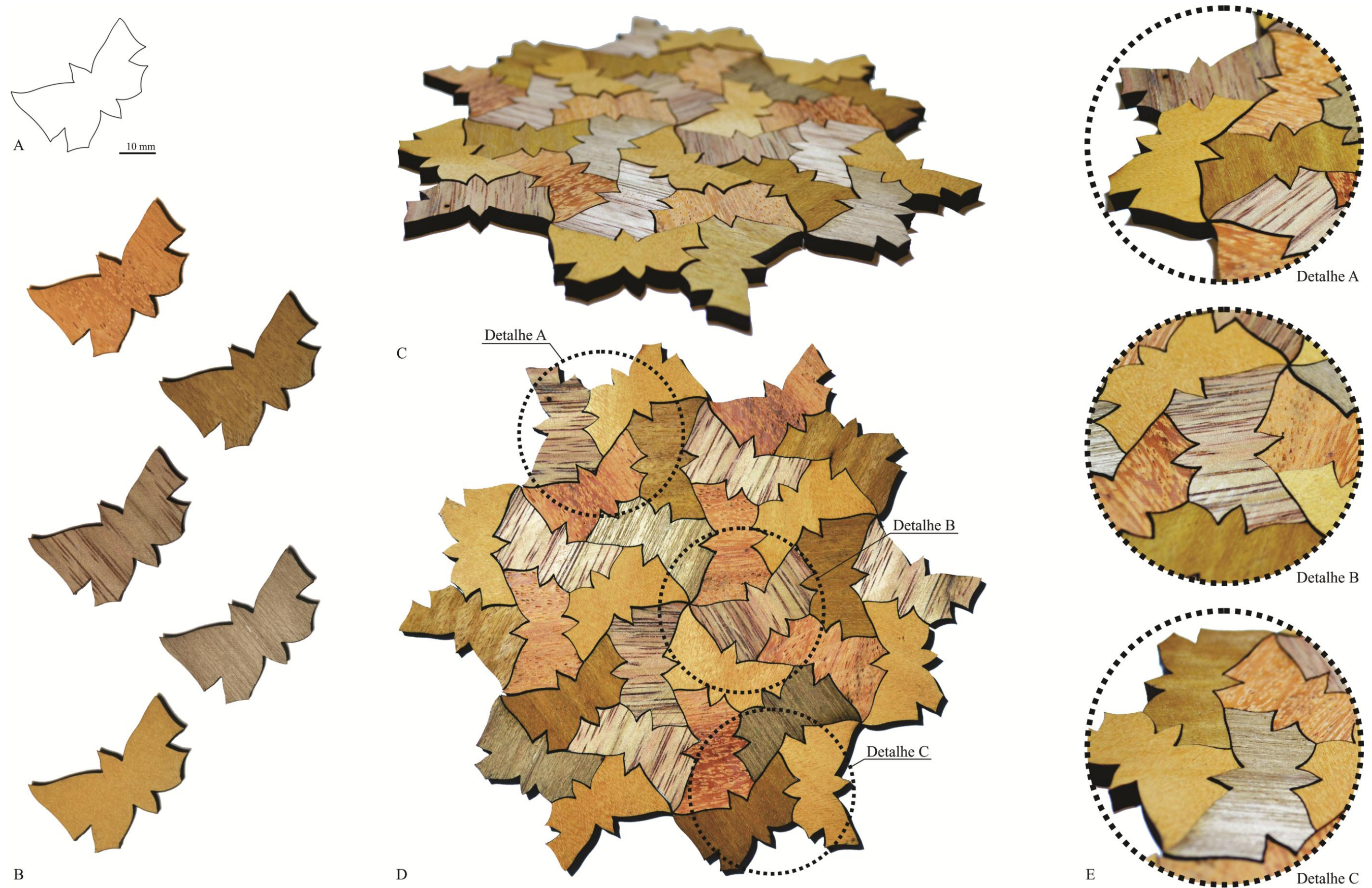
(A) Padrão esquilo; (B) Peças cortadas das diferentes espécies: de cima para baixo, coluna da esquerda – angelim da mata, cedro mara e garapeira – e coluna da direita – itaúba, louro amazonense e tauari; (C) Painel marchetado com 24 peças; (D) Vista superior do painel marchetado com demarcações das áreas dos detalhes A, B e C; (E) Detalhes A, B e C do painel marchetado.

Figura 88 – Painel marchetado com o padrão lagarto executado com lâminas de 4 mm.



(A) Padrão lagarto; (B) Peças cortadas das diferentes espécies: de cima para baixo, coluna da esquerda – angelim da mata, cedro mara e garapeira – e coluna da direita – itaúba, louro amazonense e tauari; (C) Painel marchetado com 24 peças; (D) Vista superior do painel marchetado com demarcações das áreas dos detalhes A, B e C; (E) Detalhes A, B e C do painel marchetado.

Figura 89 – Painel marchetado com o padrão borboleta executado com lâminas de 5 mm.



(A) Padrão borboleta; (B) Peças cortadas das diferentes espécies: de cima para baixo, coluna da esquerda – angelim da mata, cedro mara e garapeira – e coluna da direita – itaúba e louro amazense; (C) Painel marchetado com 30 peças; (D) Vista superior do painel marchetado com demarcações das áreas dos detalhes A, B e C; (E) Detalhes A, B e C do painel marchetado.

6 CONCLUSÕES

A incorporação do design e da tecnologia na reutilização dos resíduos de madeira da indústria de esquadrias visando à produção de peças marchetadas apresenta grande potencial para o aumento da taxa de produção e controle de qualidade dos desenhos e do padrão de acabamento dos produtos de marchetaria, além de diminuir o desperdício e o descarte deste material, reduzindo a exploração da madeira virgem. Os resíduos madeireiros como matéria-prima de reutilização na marchetaria podem assegurar novas fontes de renda, incentivando a economia, e a tecnologia do corte a laser como fator de inovação no processo produtivo da marchetaria pode atestar maior agilidade na execução das peças, além de garantir produtos com elevado nível de precisão e detalhamento, passíveis de fabricação em larga escala.

A tecnologia do laser, em comparação com os processos atuais de corte da marchetaria, apresenta benefícios. Dentre os processos convencionais de marchetaria apresentados, a técnica elemento por elemento é a que apresenta maior agilidade de execução uma vez que lâminas de diferentes espécies de madeira são sobrepostas umas às outras para a realização do corte, sendo o número de composições proporcional ao de lâminas utilizadas. Porém, quanto maior o número de lâminas, mais difícil se torna a execução do corte, e maior tem de ser a espessura da serra, gerando um maior afastamento entre as peças adjacentes e uma menor precisão de corte. Como vantagem sobre esta técnica, o emprego da tecnologia do laser na marchetaria possibilita o corte de inúmeras peças em um curto intervalo de tempo sem a necessidade de sobreposição de lâminas. Além disso, a medida adicional acrescentada ao desenho de projeto, determinada em função da quantidade de material vaporizado pela ação do laser, evita o espaçamento entre peças adjacentes.

As técnicas inviabilizadas pela tecnologia do corte a laser seriam o corte bisel e a marchetaria em bloco. A primeira, porém, foi desenvolvida para que o espaçamento entre peças adjacentes fosse diminuído por meio do corte angulado das lâminas, e, tendo o artifício da medida adicional do processamento a laser, se torna dispensável. A segunda, por outro lado, não é possível com o uso do laser já que a espessura do material a ser cortado é muito grande, o que provavelmente ocasionaria a queima do material pela necessidade de maior tempo de interação com o laser para o corte efetivo do bloco.

Já os painéis resultantes da parquetaria e da técnica de bouille seriam viáveis pela tecnologia do corte a laser. Obviamente o método empregado para sua execução seria outro, ainda assim, o tempo de execução seria reduzido e o espaçamento entre as peças adjacentes também.

Dentre as dificuldades encontradas na pesquisa, está o processo de transformação dos resíduos das indústrias de esquadrias em lâminas de espessuras utilizáveis em marchetaria. Para que os painéis marchetados apresentem acabamento superficial uniforme e nivelado, é preciso que as lâminas sejam produzidas com espessura regular. Com o processo de obtenção de lâminas utilizado neste trabalho, além das lâminas produzidas terem apresentado irregularidade de espessura, marcas originadas pela rotação da serra de corte ficaram evidentes nas peças. Esta é uma questão que precisa ser sanada para o aprimoramento dos produtos marchetados a partir de resíduos madeireiros.

Outra limitação encontrada com o trabalho foi o resultado obtido pelo feixe de laser no início e fim do corte das peças. Nestes pontos, a interação laser-material gerou alteração, por vezes, na coloração da madeira na porção superior das peças, e, por vezes, na precisão do corte. Esta questão é, porém, passível de ajustes, como, por exemplo, iniciando e finalizando o corte fora da peça.

Em se tratando destes quesitos – grau de precisão de corte e variação da coloração da porção superior das peças – foi visto que para a totalidade das espécies de madeira estudadas, e com os parâmetros analisados, quanto maior a espessura da lâmina, maior o tempo de interação laser-material para o rompimento total da mesma, portanto, menores velocidades de movimentação dos bocais de corte. E a partir deste maior tempo de interação laser-material, maior a possibilidade do surgimento de zonas afetadas pelo calor, e de alteração da coloração da madeira. Por outro lado, para as lâminas de menor espessura, o tempo de ação do laser sobre o material é menor, e, portanto, são possíveis maiores velocidades de movimentação dos bocais de corte, diminuindo a probabilidade da queima excessiva de material e alteração na coloração da madeira. Porém, estas velocidades maiores são mais suscetíveis a cortes com menor grau de precisão.

Para o corte efetivo das lâminas de 5 mm de espessura, as velocidades variaram entre 5 e 25 mm/s, dependendo da espécie; de 4 mm, entre 15 e 40 mm/s; de 3 mm, entre 20 e 55 mm/s; de 2 mm, entre 70 e 100 mm/s; e de 1 mm, a velocidade para o corte efetivo das lâminas foi de 100 mm/s para a totalidade das espécies. Estes dados indicam que para a espessura de 1 mm, além do tempo necessário de interação laser-material ser menor, as espécies tendem a demonstrar comportamento similar em relação ao processamento a laser, ainda que possuam propriedades e características distintas entre si.

Quanto ao grau de complexidade geométrica dos cinco padrões escolhidos para as cinco espessuras de lâmina dos painéis marchetados, foi percebida a influência de sua variabilidade no resultado da interação laser-material. Contrariamente ao comportamento

esperado, as peças de 2 mm, cortadas com o padrão libélula, tiveram uma maior zona afetada pelo calor, apresentando queima na porção superior, enquanto as peças de 5 mm, cortadas no padrão borboleta, não apresentaram queima alguma. Como já mencionado, para todas as espécies, as lâminas de 2 mm de espessura são passíveis de corte a velocidades bem mais altas do que as de 5 mm, diminuindo consideravelmente a possibilidade do surgimento das zonas afetadas pelo calor. A queima e alteração da coloração destas peças de 2 mm indicam que o grau de complexidade dos padrões a serem replicados influencia no resultado do processamento a laser. É possível que padrões geométricos mais complexos, como curvas de grande sinuosidade ou trechos bastante estreitos, acarretem diferença na difusão do calor na peça, o que por sua vez, pode alterar as propriedades e comportamentos de material durante o corte das peças.

Em relação ao equipamento utilizado, a mesa de tampo metálico vazado, onde são colocadas as lâminas para a realização dos cortes, por vezes, marcou a parte posterior das peças cortadas quando utilizadas baixas velocidades de movimentação dos bocais de corte. Isto se deve, provavelmente, porque o metal sendo bom condutor armazenou o calor emitido pela ação do laser em demasia, originando a queima do material em contato com o tampo. Além disso, o tampo sendo vazado dificulta o corte de peças muito pequenas que podem se perder por entre os espaços vazios (hexágonos regulares de aresta de 2,5 mm).

Outra questão levantada sobre o equipamento é a necessidade de um mecanismo de fixação das peças a serem cortadas, pois amostras com área e espessura de dimensões menores tendem a se movimentar sob a ação do fluxo de saída do jato de ar, tornando o corte das peças bastante impreciso.

Foi identificada, ainda, a necessidade de que o equipamento de corte a laser e as lâminas de madeira permaneçam em uma sala climatizada, livre de variações de temperatura e umidade, evitando assim possíveis alterações nos resultados do processamento de corte a laser.

Como já mencionado, uma das tarefas do design é a de, entendendo o comportamento do material empregado, experimentar e validar novas tecnologias para os processos produtivos, derivando em um produto passível de produção em série que responda às necessidades físicas e psíquicas de seus usuários, considerando também o ambiente. A tecnologia de corte a laser, ainda que apresentando problemas e necessitando ajustes, pode ser um instrumento de transformação dos resíduos madeireiros em produtos marchetados com valor estético e apreciativo agregado, viabilizando a inovação da marchetaria por meio de um processo produtivo mais eficaz, possibilitando também a produção seriada.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Como continuidade da investigação do processamento a laser em resíduos de diferentes espécies de madeiras, sugerem-se alguns caminhos de pesquisa:

- Para um material de trabalho com espessuras constantes em todas as direções, e, portanto, peças com resultados de processamento a laser mais regulares, além de painéis marchetados com acabamento superficial nivelado, seria pertinente o estudo e o aprimoramento do processo de laminação dos resíduos de madeira.
- Para uma verificação mais aprofundada dos parâmetros do processamento a laser relacionados à execução de um corte preciso, regular e contínuo das lâminas de madeira, a variável aceleração poderia ser analisada mais a fundo. Ensaio variando os valores de aceleração e fixando as velocidades de movimentação dos bocais de corte seriam pertinentes. Além disso, poderiam ser testados diferentes graus de complexidade de curvaturas de desenhos fixando as variáveis aceleração e velocidade. Dessa maneira, poderia ser verificado se a aceleração e velocidade variam de acordo com mudanças na direção da movimentação dos bocais de corte.
- Para uma investigação mais profunda do processamento a laser com respeito à variabilidade da complexidade das peças a serem cortadas, a relação entre a espessura das lâminas e o grau de complexidade dos desenhos poderia ser melhor estudada. Ensaio com lâminas de mesma espessura variando o grau de complexidade dos desenhos e ensaio com desenhos de mesma complexidade variando a espessura das lâminas poderiam ser realizados.
- Para averiguar de maneira mais profunda o comportamento das madeiras em relação ao surgimento de zonas afetadas pelo calor, e a consequente alteração na coloração das peças, a variável potência do feixe de laser poderia ser melhor avaliada. Ensaio variando os valores de potência, e fixando as demais variáveis poderiam apresentar resultados esclarecedores. Somando-se a isso, a variação do fluxo de saída do jato de ar para refrigeração também poderia ser verificada, uma vez que também reflete na porcentagem de queima de material.

- Para um melhor entendimento das características físico-químicas das madeiras e suas relações com o processamento a laser, seria indicado um estudo aprofundado dos elementos químicos encontrados nas diferentes espécies e influenciados mesmos nas propriedades do material. Outros ensaios para a caracterização de cada espécie também seriam pertinentes, como a determinação da dureza, da estrutura e das porcentagens dos constituintes da madeira (celulose, lignina e hemicelulose), e dos componentes orgânicos.
- Para a avaliação temporal e climática do processamento a laser em peças de madeira que irão compor painéis marchetados, sujeitos à ação do tempo, temperatura e umidade, seriam interessantes análises de dados levantados com o emprego de uma câmara climática. As propriedades de estabilidade dimensional das diferentes espécies poderiam ser avaliadas nas peças marchetadas verificando os possíveis danos aos encaixes dos elementos adjacentes em função de variações de temperatura e umidade.
- Para avaliar a possibilidade de inserção da proposta desta pesquisa no mercado, além do estudo de viabilidade técnica apresentado, seria pertinente um estudo de viabilidade econômico-financeira.

Ressalta-se que para os ensaios de processamento a laser propostos é conveniente que o equipamento de corte a laser a ser utilizado esteja localizado em um ambiente climatizado, livre de variações de temperatura e umidade do ar. E ainda, que as lâminas de madeira sejam também mantidas em ambiente climatizado, com controle de umidade relativa do ar menor ou igual a 65%, garantindo que o material apresente 12% de umidade, valor na qual a densidade aparente pode ser medida para toda e qualquer espécie de madeira. O uso de ambientes climatizados tanto para o material quanto para o processo, asseguraria um melhor controle dos parâmetros testados.

REFERÊNCIAS

- ABRAF. **Anuário estatístico da ABRAF: ano base 2009**. Brasília - DF, 2010.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **NBR 7.190: Projeto de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro, 1997.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **NBR 10.004: Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.
- BARBOSA, J. C.; CAMPOS, C. I. de; VASCONCELOS, J. S.; ARAUJO, V. A. de; WAKABAYASHI, M. K.; REGLI J. P. **Aproveitamento de resíduos da indústria madeireira para utilização em pequenos empreendimentos econômicos solidários**. In: 3rd International Workshop - Advances in Cleaner Production, Cleaner Production Initiatives and Challenges for a Sustainable World, São Paulo – SP, maio de 2011.
- BRAND, M. A.; KLOCK, U.; MUÑIZ, G. I. B. de; SILVA, D. A. da. **Avaliação do processo produtivo de uma indústria de manufatura de painéis por meio do balanço de material e do rendimento da matéria-prima**. Revista Árvore, Viçosa - MG, v.28, n.4, p.553-562, 2004.
- BRITO, E. O. **Estimativa da produção de resíduos na indústria de serraria e laminação de madeira**. Revista da Madeira, Curitiba-PR, n. 26, p. 34-39, 1995.
- CIDADE, M. K. **Caracterização e padronização do processo de gravação a laser em ágata aplicado ao design de joias**. Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Design, UFRGS, Porto Alegre – RS, 2012.
- DÉJARDIN, A.; LAURANS, F.; ARNAUD, D.; BRETON, C.; PILATE, G.; LEPLÉ, J-C. **Wood formation in angiosperms**. Comptes Rendus Biologies, v. 333, p. 325-334, 2010.
- DIAS, F. M.; LAHRS, F. A. R. **Estimativa de propriedades de resistência e rigidez da madeira através da densidade aparente**. Scientia Forestalis, n. 65, p. 102-113, junho de 2004.
- DOWNES, G. M.; DREW, D.; BATTAGLIA, M.; SCHULZE, D. **Measuring and modeling stem growth and wood formation: an overview**. Dendrochronologia, v. 27, p. 147-157, 2009.

DUTRA, R. I. J. P.; NASCIMENTO, S. M. do; NUMAZAWA, S. **Resíduos de indústria madeireira: caracterização, conseqüências sobre o meio ambiente e opções de uso.** Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal, ed. 5, janeiro de 2005.

GIBBS, N. **Directorio de maderas. Una guía ilustrada de 100 maderas decorativas y sus usos.** Barcelona: Acanto, 2006.

GIBERT, V.; LÓPEZ J.; ORDOÑEZ, J. **Embutidos.** Lisboa: Editorial Estampa, 2000.

GONZAGA, A. L. **Madeira: Uso e Conservação.** Brasília - DF: IPHAN/MONUMENTA, 2006.

HAN, A.; GUBENCU, D.; PILLON, G. **A generalized structure based on systemic principles of the characteristic variables of material laser processing.** Optics and Laser Technology, v. 37, p. 577-581, 2005.

HILLIG, E.; SCHNEIDER V. E.; PAVONI E. T. **Geração de resíduos de madeira e derivados da indústria moveleira em função das variáveis de produção.** Produção, v. 19, n. 2, p. 292-303, maio/ago de 2009.

IIDA, I.; MAYNARDES, A. C.; GUSMÃO, D. L. C.; HUDSON, F.; DIETZSCH, R.; GLIOSCI, R.; PINHO, T. **Projeto de Design de Móveis com Madeiras Alternativas da Amazônia.** In: P&D Design 2010 - 9º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Design, 2010. São Paulo - SP, outubro de 2010.

KOPF, S. **A marquetry odyssey: historical objects and personal work.** USA: Hudson Hills Press, 2008.

LEEUWEN M.; HILKER, T.; COOPS, N. C.; FRAZER, G.; WULDER, M. A.; NEWNHAM, G. J.; CULVENOR, D. S. **Assessment of standing wood and fiber quality using ground and airborne laser scanning: a review.** Forest Ecology and Management, v. 261, p. 1467-1478, 2011.

LIDWELL, W.; HOLDEN, K.; BUTLER, J. **Princípios Universais do Design.** Porto Alegre: Bookman, 2010.

LIMA, E. G. de; SILVA, D. A. da. **Resíduos gerados em indústrias de móveis de madeira situadas no Pólo Moveleiro de Arapongas-PR.** Revista Floresta. Curitiba - PR, v. 35, n. 01, jan./abril de 2005.

LÖBACH, B. **Design Industrial – Bases para a configuração dos produtos industriais**. São Paulo: Editora Blucher, 2001.

LOPES, C. S. D. **Desenho de Pequenos Objetos de Madeira com Resíduos da Indústria de Processamento Mecânico da Madeira**. InterfacEHS: Revista de Saúde, Meio Ambiente e Sustentabilidade, v. 4, n. 3, 2009.

LOPES, C. S. D; TOMAZELLO Fo., M. **Estudo da madeira de eucalipto para avaliação do potencial de uso em movelaria**. In: P&D Design 2010 - 9º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Design, 2010. São Paulo - SP, outubro de 2010.

MANZINI, Ezio. **A Matéria da Invenção**. Lisboa: Centro Português de Design, 1993.

MANZINI, E.; VEZZOLI, C. **O Desenvolvimento de Produtos Sustentáveis: Os requisitos ambientais dos produtos industriais**. 1ª Ed. 2ª Reimpr. São Paulo: Edusp, 2008.

MARQUES, A. C. **Análise de similares: desenvolvimento de uma metodologia de seleção de materiais e ecodesign**. Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, UFRGS, Porto Alegre - RS, 2008.

MUNARI, B. **Das coisas nascem coisas**. 2ª Ed. São Paulo: Martins Fontes, 2008.

NASCIMENTO, N. C. do. **Geração de resíduos sólidos em uma indústria de móveis de médio porte**. Dissertação de mestrado, Centro de Ciências Exatas, Naturais e Tecnologias, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental, UNAERP, Riberão Preto - SP, 2009.

NOGUEIRA, E. M.; NELSON, B. W.; FEARNSIDE, P. M. **Wood density in dense forest in central Amazonia, Brazil**. Forest Ecology and Management, v. 208, p. 261-286, 2005.

OLANDOSKI, D. P. **Rendimento, resíduos e considerações sobre melhorias no processo em indústrias de chapas compensadas**. Dissertação de mestrado, Centro de Ciências Florestais e da Madeira, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, UFPR, Curitiba – PR, 2001.

PAPANEEK, Victor. **Arquitetura e Design. Ecologia e Ética**. Lisboa: Edições 70, 2007.

PEREIRA, A. F. **Ecodesign na indústria moveleira**. Revista da Madeira, Curitiba - PR, n. 77, novembro de 2003.

- PEREIRA, A. F.; CARVALHO, L. S. C. **Resíduo de madeira: matéria-prima alternativa usada sob critérios de ecodesign e design estratégico**. In: P&D Design 2010 - 9º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Design, 2010. São Paulo - SP, outubro de 2010.
- PEREIRA, A. F.; CARVALHO, L. S. C.; PINTO, A. C. O. **Resíduo de madeira: limites e possibilidades de seu uso como matéria-prima alternativa**. In: P&D Design 2010 - 9º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Design, 2010. São Paulo - SP, outubro de 2010.
- POPESCU, M. C.; POPESCU, C. M.; LISA, G.; SAKATA, Y. **Evaluation of morphological and chemical aspects of different wood species by spectroscopy and thermal methods**. Journal of Molecular Structure, v. 988, p. 65-72, 2011.
- RAMOND, P. **Masterpieces of marquetry. From the Beginnings to Louis XIV**. Volume I, Los Angeles: The J. Paul Getty Museum, 2000a.
- RAMOND, P. **Masterpieces of marquetry. From the Régence to the Present day**. Volume II, Los Angeles: The J. Paul Getty Museum, 2000b.
- REVISTA DA MADEIRA. **Gestão de resíduos sólidos na indústria madeireira**. Paraná: Lettech Ltda, n. 77, p 83-85, novembro de 2003.
- ROMEIRO FILHO, E. **Projeto do Produto**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.
- SCHATTSCHEIDER, D. M. C. **Escher: visions of symmetry**. New York: Abrams, 1990.
- SILVEIRA, F. L. **Uso de usinagem por jato de água, usinagem por controle numérico computadorizado e corte a laser no design de superfícies táteis a partir de padrões modulares encaixáveis em ágata e cedro**. Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Design, UFRGS, Porto Alegre – RS, 2011.
- STÜRMER, P. G. S. **Materiais naturais: design e tecnologia no desenvolvimento de joias inspiradas na cultura gaúcha**. Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Design, UFRGS, Porto Alegre – RS, 2010.
- THOMPSON, R. **The manufacturing Guides: Prototyping and Low-volume Production**. United Kingdom: Thames & Hudson, 2011.
- ULIANA, L. R. **Diagnóstico da geração de resíduos na produção de móveis: subsídios para a gestão empresarial**. Dissertação de mestrado, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ, USP, Piracicaba – SP, 2005.

VIEIRA, L.; A.; N.; CARVALHO, R.; M.; M.; SOARES, T.; S.; REZENDE, J. ; B. **Caracterização do Complexo Florestal Industrial**. Revista da Madeira, Curitiba - PR, ed. 91, agosto de 2005.

WALKER, A. **Enciclopedia de la Madera. 150 tipos de madera del mundo**. Barcelona: Blume, 2007.

ZOLDAN, M. A.; LEITE, M. L. G.; KOVALESKI, J. L. **A otimização de processo e a importância da classificação de resíduos no setor madeireiro – Estudo de caso**. In: XIII SIMPEP, 2006. Bauru - SP, novembro de 2006.

APÊNDICE A – Tabela com médias, máximas, mínimas e desvios padrão das profundidades de corte resultante das velocidades testadas em que não houve rompimento total da lâmina, medidas na extremidade e meio das amostras da espécie Angelim da mata (*Hymenolobium excelsum*)

Velocidades de Corte (mm/s)	Amostras de 5 mm							
	Extremidade				Meio			
	Média	Máxima	Mínima	D P	Média	Máxima	Mínima	D P
20	3,47	4,68	1,08	0,90	4,34	4,68	4,05	0,19
25	2,87	3,91	2,31	0,48	3,73	4,09	3,04	0,34
30	2,45	3,08	1,80	0,34	3,13	3,66	2,55	0,37
35	2,16	2,89	1,61	0,41	2,77	3,21	2,32	0,29
40	2,00	2,97	1,52	0,45	2,35	3,09	1,84	0,34
45	1,75	2,32	1,26	0,32	2,22	2,75	1,73	0,31
50	1,56	2,58	1,11	0,39	2,02	2,83	1,31	0,37
55	1,34	1,62	0,89	0,20	1,65	2,05	1,30	0,27
60	1,25	1,63	0,96	0,20	1,69	2,10	1,42	0,23
65	1,30	1,76	0,89	0,23	1,74	2,29	1,11	0,32
70	1,25	1,58	0,92	0,20	1,57	2,05	1,16	0,36
75	1,34	1,83	0,91	0,25	1,48	1,81	1,11	0,23
80	1,34	2,13	0,93	0,33	1,43	2,14	0,95	0,38
85	1,34	1,96	1,03	0,28	1,25	1,60	0,88	0,26
90	1,32	1,75	1,09	0,21	1,08	1,35	0,79	0,16
95	1,30	1,98	1,02	0,26	1,16	1,49	0,88	0,22
100	1,27	1,74	1,05	0,18	1,11	1,32	0,86	0,17

Velocidades de Corte (mm/s)	Amostras de 4 mm							
	Extremidade				Meio			
	Média	Máxima	Mínima	D P	Média	Máxima	Mínima	D P
25	3,90	4,00	3,76	0,09	3,83	4,00	3,70	0,09
30	3,63	4,00	2,89	0,37	3,72	4,00	3,49	0,14
35	3,27	3,83	2,81	0,33	3,47	3,80	2,67	0,28
40	2,96	3,72	2,35	0,45	3,29	3,88	2,77	0,31
45	2,98	3,72	2,17	0,42	3,15	3,76	2,06	0,47
50	2,59	3,01	1,98	0,31	2,76	3,64	2,35	0,40
55	2,45	2,91	2,00	0,28	2,43	2,87	2,25	0,16
60	2,54	3,10	2,02	0,38	2,40	3,09	1,76	0,37
65	2,42	3,23	1,89	0,46	2,42	2,83	1,89	0,26
70	2,44	2,92	1,94	0,29	2,16	2,93	1,74	0,33
75	2,40	3,00	1,92	0,28	2,15	2,54	1,55	0,26
80	2,48	3,10	1,81	0,37	1,95	2,41	1,25	0,30
85	2,30	2,98	1,81	0,35	1,86	2,47	1,03	0,43
90	2,36	3,15	1,73	0,38	1,69	2,66	1,09	0,42
95	2,41	3,21	1,80	0,44	1,64	2,12	0,91	0,36
100	2,36	2,98	1,84	0,35	1,78	2,10	1,41	0,16

Velocidades de Corte (mm/s)	Amostras de 3 mm							
	Extremidade				Meio			
	Média	Máxima	Mínima	D P	Média	Máxima	Mínima	D P
30	1,93	2,66	1,49	0,34	2,53	3,00	1,87	0,39
35	1,75	2,51	1,33	0,31	2,39	3,00	1,56	0,41
40	1,46	2,00	1,11	0,25	2,12	2,89	1,33	0,49
45	1,35	1,55	1,13	0,14	2,03	2,79	1,17	0,46
50	1,25	1,56	1,00	0,18	1,81	2,34	1,27	0,35
55	1,24	1,81	0,93	0,24	1,73	2,51	1,09	0,41
60	1,19	2,32	0,86	0,37	1,56	2,18	0,89	0,33
65	1,03	1,40	0,78	0,18	1,39	1,88	0,96	0,30
70	1,00	1,26	0,78	0,13	1,23	1,65	0,91	0,24
75	0,97	1,32	0,72	0,18	1,16	1,49	0,84	0,20
80	0,90	1,52	0,61	0,23	1,08	1,51	0,51	0,30
85	0,75	1,07	0,57	0,14	0,96	1,48	0,38	0,32
90	0,77	0,95	0,51	0,12	0,96	1,64	0,54	0,26
95	0,73	1,07	0,52	0,14	0,95	1,89	0,49	0,34
100	0,72	0,97	0,58	0,10	1,01	1,59	0,25	0,38

Velocidades de Corte (mm/s)	Amostras de 2 mm							
	Extremidade				Meio			
	Média	Máxima	Mínima	D P	Média	Máxima	Mínima	D P
75	1,57	2,00	1,07	0,23	1,81	2,00	1,46	0,19
80	1,41	1,65	0,99	0,22	1,85	2,00	1,32	0,19
85	1,34	1,79	0,98	0,23	1,59	1,99	1,04	0,35
90	1,31	1,74	0,94	0,26	1,59	1,99	0,95	0,34
95	1,28	1,63	0,88	0,25	1,64	2,00	1,17	0,25
100	1,25	1,69	0,90	0,21	1,50	1,98	0,71	0,39

APÊNDICE B – Tabela com médias, máximas, mínimas e desvios padrão das profundidades de corte resultante das velocidades testadas em que não houve rompimento total da lâmina, medidas na extremidade e meio das amostras da espécie Cedro mara (*Cedrelinga catenaeformis*)

Velocidades de Corte (mm/s)	Cedro mara - Amostras de 5 mm							
	Extremidade				Meio			
	Média	Máxima	Mínima	D P	Média	Máxima	Mínima	D P
30	4,49	4,71	4,20	0,19	4,38	4,69	3,68	0,29
35	3,95	4,67	3,23	0,41	3,92	4,45	3,18	0,34
40	3,71	4,66	3,07	0,36	3,57	4,23	3,07	0,36
45	3,29	4,03	2,80	0,32	3,18	3,75	2,45	0,42
50	2,93	3,31	2,53	0,23	2,84	3,56	2,04	0,42
55	2,72	3,22	2,27	0,28	2,72	3,22	1,98	0,35
60	2,54	3,06	1,97	0,28	2,45	2,97	1,81	0,31
65	2,48	3,01	2,14	0,26	2,33	2,78	1,65	0,34
70	2,44	3,08	2,12	0,28	2,13	2,66	1,41	0,37
75	2,51	2,92	1,97	0,29	2,11	2,62	1,46	0,34
80	2,45	2,84	2,00	0,26	2,03	2,47	1,40	0,31
85	2,53	3,04	1,98	0,28	1,87	2,37	1,38	0,31
90	2,52	3,10	1,95	0,32	1,68	2,24	1,23	0,32
95	2,52	2,97	2,01	0,32	1,64	2,13	1,21	0,26
100	2,56	3,06	2,10	0,34	1,49	2,21	1,10	0,32

Velocidades de Corte (mm/s)	Cedro mara - Amostras de 4 mm							
	Extremidade				Meio			
	Média	Máxima	Mínima	D P	Média	Máxima	Mínima	D P
45	3,78	3,99	3,61	0,13	3,71	3,99	3,45	0,15
50	3,60	3,99	3,01	0,28	3,66	4,00	3,26	0,20
55	3,53	3,94	2,80	0,30	3,58	3,93	3,13	0,24
60	3,36	3,85	2,51	0,37	3,51	3,84	2,79	0,33
65	3,23	3,81	2,37	0,43	3,32	3,84	2,19	0,47
70	3,10	3,55	2,27	0,33	3,05	3,51	2,54	0,30
75	2,98	3,53	1,91	0,44	2,97	3,44	2,14	0,37
80	3,01	3,54	2,07	0,41	2,89	3,64	2,27	0,35
85	3,07	3,74	2,22	0,44	2,80	3,32	1,58	0,55
90	3,13	3,84	2,18	0,44	2,71	3,46	1,63	0,48
95	3,16	3,58	2,23	0,38	2,54	3,07	1,55	0,40
100	3,13	3,81	2,10	0,49	2,31	3,18	0,96	0,58

Velocidades de Corte (mm/s)	Cedro mara - Amostras de 3 mm							
	Extremidade				Meio			
	Média	Máxima	Mínima	D P	Média	Máxima	Mínima	D P
60	2,66	3,00	1,78	0,37	2,79	3,00	2,08	0,31
65	2,57	3,00	1,91	0,38	2,67	3,00	1,87	0,37
70	2,39	2,95	1,67	0,44	2,42	3,00	1,75	0,44
75	2,13	2,81	1,41	0,46	2,27	2,98	1,66	0,45
80	2,02	2,83	1,24	0,48	2,14	2,96	1,51	0,44
85	1,81	2,46	1,12	0,43	1,97	2,61	1,41	0,34
90	1,71	2,14	1,17	0,32	1,81	2,17	1,35	0,30
95	1,57	1,94	0,94	0,31	1,66	2,37	1,24	0,30
100	1,48	1,90	1,03	0,27	1,59	2,16	1,11	0,29

APÊNDICE C – Tabela com médias, máximas, mínimas e desvios padrão das profundidades de corte resultante das velocidades testadas em que não houve rompimento total da lâmina, medidas na extremidade e meio das amostras da espécie Garapeira (*Apuleia molaris*)

Velocidades de Corte (mm/s)	Garapeira - Amostras de 5 mm							
	Extremidade				Meio			
	Média	Máxima	Mínima	D P	Média	Máxima	Mínima	D P
20	4,99	5,00	4,95	0,02	4,60	4,83	4,35	0,15
25	3,99	4,62	3,55	0,29	4,03	4,55	3,70	0,25
30	3,44	4,14	3,06	0,33	3,50	4,10	3,19	0,27
35	2,90	3,35	2,63	0,21	3,04	3,50	2,59	0,26
40	2,76	2,99	2,44	0,19	2,61	2,92	2,12	0,26
45	2,46	2,80	2,10	0,18	2,31	2,72	1,97	0,23
50	2,18	2,56	1,91	0,23	2,10	2,52	1,68	0,23
55	1,98	2,49	1,64	0,21	1,87	2,47	1,54	0,25
60	1,83	2,16	1,55	0,18	1,75	1,97	1,47	0,14
65	1,84	2,17	1,58	0,18	1,72	2,01	1,43	0,18
70	1,86	2,16	1,62	0,16	1,60	1,89	1,38	0,18
75	2,00	2,32	1,77	0,16	1,57	1,94	1,30	0,17
80	1,98	2,32	1,72	0,20	1,49	1,75	1,08	0,17
85	1,99	2,33	1,71	0,17	1,38	1,68	1,06	0,19
90	1,91	2,27	1,61	0,18	1,29	1,57	0,89	0,23
95	1,95	2,37	1,76	0,17	1,18	1,54	0,87	0,17
100	1,94	2,38	1,73	0,18	1,15	1,35	0,83	0,14

Velocidades de Corte (mm/s)	Garapeira - Amostras de 4 mm							
	Extremidade				Meio			
	Média	Máxima	Mínima	D P	Média	Máxima	Mínima	D P
30	3,77	3,93	3,54	0,12	3,80	3,99	3,54	0,14
35	3,65	3,85	3,10	0,21	3,66	3,90	3,31	0,18
40	3,38	3,63	3,01	0,21	3,30	3,93	2,58	0,33
45	3,17	3,74	2,75	0,27	3,03	3,55	2,60	0,28
50	2,98	3,30	2,56	0,22	2,73	3,10	2,32	0,19
55	2,77	3,13	2,17	0,25	2,54	2,96	2,06	0,28
60	2,68	3,05	2,08	0,27	2,42	2,71	1,93	0,24
65	2,62	3,41	2,25	0,33	2,34	2,67	1,89	0,24
70	2,69	3,21	2,33	0,25	2,27	2,62	1,85	0,18
75	2,72	3,09	2,24	0,24	2,13	2,47	1,92	0,18
80	2,72	3,25	2,28	0,32	2,15	2,69	1,85	0,22
85	2,85	3,21	2,24	0,28	1,94	2,36	1,64	0,19
90	2,64	3,31	2,03	0,39	1,76	2,03	1,33	0,18
95	2,67	3,22	2,19	0,36	1,71	1,91	1,43	0,16
100	2,68	3,36	2,17	0,39	1,75	2,01	1,47	0,15

Velocidades de Corte (mm/s)	Garapeira - Amostras de 3 mm							
	Extremidade				Meio			
	Média	Máxima	Mínima	D P	Média	Máxima	Mínima	D P
40	2,43	2,95	2,04	0,28	2,54	2,85	2,27	0,14
45	2,23	2,91	1,84	0,33	2,33	2,82	1,97	0,24
50	2,02	2,42	1,70	0,23	2,06	2,41	1,83	0,20
55	1,81	2,26	1,47	0,23	1,88	2,33	1,69	0,20
60	1,62	1,89	1,36	0,14	1,71	2,01	1,54	0,13
65	1,54	1,84	1,23	0,17	1,51	1,80	1,28	0,15
70	1,42	1,66	1,19	0,15	1,45	1,74	1,18	0,17
75	1,36	1,57	1,13	0,14	1,39	1,77	1,01	0,21
80	1,19	1,53	0,95	0,16	1,27	1,72	0,95	0,18
85	1,14	1,42	0,92	0,15	1,19	1,64	0,94	0,19
90	1,09	1,35	0,93	0,11	1,16	1,51	0,95	0,15
95	1,04	1,23	0,93	0,09	1,06	1,37	0,78	0,15
100	0,98	1,25	0,83	0,12	0,98	1,38	0,85	0,15

Velocidades de Corte (mm/s)	Garapeira - Amostras de 2 mm							
	Extremidade				Meio			
	Média	Máxima	Mínima	D P	Média	Máxima	Mínima	D P
95	1,75	1,86	1,59	0,10	1,71	1,92	1,51	0,14
100	1,68	1,80	1,51	0,09	1,68	1,93	1,53	0,12

APÊNDICE D – Tabela com médias, máximas, mínimas e desvios padrão das profundidades de corte resultante das velocidades testadas em que não houve rompimento total da lâmina, medidas na extremidade e meio das amostras da espécie Itaúba (*Mezilaurus itauba*)

Velocidades de Corte (mm/s)	Itaúba - Amostras de 5 mm							
	Extremidade				Meio			
	Média	Máxima	Mínima	D P	Média	Máxima	Mínima	D P
15	3,70	4,51	3,08	0,41	3,77	4,08	3,58	0,17
20	3,06	3,72	2,53	0,33	2,95	3,12	2,80	0,10
25	2,49	3,32	2,01	0,36	2,47	2,70	2,17	0,16
30	2,16	2,65	1,69	0,30	2,26	2,51	1,88	0,20
35	1,95	2,33	1,77	0,18	1,88	2,11	1,55	0,15
40	1,64	2,13	1,32	0,20	1,64	1,90	1,53	0,10
45	1,47	1,75	1,22	0,18	1,52	1,72	1,37	0,10
50	1,46	1,84	1,14	0,22	1,35	1,52	1,21	0,08
55	1,43	1,75	1,12	0,19	1,29	1,58	1,08	0,16
60	1,46	1,94	1,13	0,21	1,33	1,70	1,12	0,14
65	1,45	1,72	1,19	0,15	1,32	1,54	1,10	0,12
70	1,49	1,89	1,26	0,19	1,16	1,30	1,07	0,08
75	1,47	1,78	1,22	0,16	1,12	1,26	0,88	0,12
80	1,54	1,85	1,27	0,19	1,05	1,21	0,92	0,10
85	1,48	1,80	1,22	0,16	0,99	1,25	0,84	0,11
90	1,52	1,98	1,23	0,21	0,92	1,14	0,72	0,14
95	1,49	1,71	1,32	0,10	0,90	1,08	0,74	0,10
100	1,48	1,72	1,30	0,13	0,79	0,91	0,69	0,05

Velocidades de Corte (mm/s)	Itaúba - Amostras de 4 mm							
	Extremidade				Meio			
	Média	Máxima	Mínima	D P	Média	Máxima	Mínima	D P
25	3,77	3,99	3,49	0,15	3,99	4,00	3,93	0,02
30	3,67	3,92	3,25	0,18	3,82	4,00	3,48	0,14
35	3,48	3,74	2,80	0,27	3,60	3,98	2,98	0,26
40	3,12	3,68	2,41	0,38	3,30	3,58	2,87	0,21
45	2,83	3,42	2,44	0,30	2,81	3,38	2,44	0,30
50	2,53	2,91	1,97	0,26	2,59	2,97	2,16	0,27
55	2,30	2,75	1,84	0,25	2,43	2,82	2,04	0,26
60	2,33	2,67	1,91	0,22	2,28	2,64	1,95	0,19
65	2,34	2,96	1,76	0,34	2,21	2,67	1,53	0,29
70	2,21	2,53	1,68	0,25	2,08	2,35	1,76	0,18
75	2,30	2,67	1,84	0,22	1,98	2,24	1,68	0,17
80	2,40	2,84	2,07	0,24	1,87	2,14	1,61	0,15
85	2,27	2,84	1,91	0,30	1,76	2,21	1,53	0,22
90	2,17	2,62	1,78	0,26	1,59	1,81	0,97	0,25
95	2,08	2,36	1,85	0,15	1,52	1,92	1,15	0,22
100	2,18	2,68	1,96	0,18	1,48	1,84	1,01	0,21

Velocidades de Corte (mm/s)	Itaúba - Amostras de 3 mm							
	Extremidade				Meio			
	Média	Máxima	Mínima	D P	Média	Máxima	Mínima	D P
30	2,44	3,00	2,03	0,29	2,08	2,43	1,70	0,23
35	2,29	3,00	1,87	0,34	1,93	2,43	1,53	0,28
40	2,04	2,39	1,73	0,23	1,71	2,22	1,38	0,25
45	1,86	2,24	1,58	0,23	1,61	2,18	1,27	0,25
50	1,66	1,89	1,37	0,15	1,47	1,88	1,17	0,17
55	1,56	1,77	1,32	0,16	1,37	1,63	1,15	0,14
60	1,46	1,70	1,20	0,15	1,31	1,57	0,99	0,16
65	1,38	1,59	1,17	0,13	1,20	1,31	1,00	0,10
70	1,23	1,66	0,98	0,20	1,15	1,35	0,95	0,11
75	1,14	1,39	0,95	0,14	1,10	1,39	0,87	0,13
80	1,12	1,38	0,94	0,12	1,00	1,16	0,78	0,10
85	1,07	1,21	0,92	0,08	0,89	1,14	0,10	0,25
90	0,99	1,27	0,82	0,13	0,86	1,12	0,76	0,10
95	0,96	1,16	0,77	0,12	0,90	1,10	0,78	0,09
100	0,94	1,18	0,80	0,12	0,76	1,00	0,65	0,10

Velocidades de Corte (mm/s)	Itaúba - Amostras de 2 mm							
	Extremidade				Meio			
	Média	Máxima	Mínima	D P	Média	Máxima	Mínima	D P
75	1,55	1,77	1,22	0,19	1,75	1,99	1,29	0,19
80	1,46	1,77	0,91	0,24	1,66	1,96	1,24	0,19
85	1,36	1,79	0,90	0,31	1,57	1,96	1,29	0,19
90	1,33	1,78	0,96	0,26	1,45	1,83	1,10	0,24
95	1,29	1,74	0,92	0,26	1,41	1,78	0,81	0,30
100	1,29	1,74	0,92	0,26	1,33	1,65	0,92	0,22

APÊNDICE E – Tabela com médias, máximas, mínimas e desvios padrão das profundidades de corte resultante das velocidades testadas em que não houve rompimento total da lâmina, medidas na extremidade e meio das amostras da espécie Louro amazonense (*Thyrsodium schomburkianum*)

Velocidades de Corte (mm/s)	Louro amazonense - Amostras de 5 mm							
	Extremidade				Meio			
	Média	Máxima	Mínima	D P	Média	Máxima	Mínima	D P
10	3,87	4,70	3,34	0,42	3,63	4,41	3,00	0,38
15	3,39	4,13	2,76	0,45	3,08	3,52	2,67	0,23
20	2,97	3,70	2,59	0,35	2,90	3,37	2,39	0,26
25	2,57	3,40	2,13	0,38	2,60	3,19	2,17	0,31
30	2,35	2,76	1,91	0,27	2,37	2,70	2,19	0,14
35	2,07	2,43	1,74	0,23	2,14	2,58	1,80	0,26
40	1,87	2,30	1,49	0,22	1,88	2,39	1,53	0,22
45	1,66	2,00	1,42	0,16	1,78	2,13	1,42	0,17
50	1,61	1,81	1,36	0,12	1,71	2,01	1,36	0,20
55	1,64	1,91	1,42	0,14	1,51	1,88	1,19	0,20
60	1,60	1,87	1,43	0,14	1,49	1,96	1,22	0,20
65	1,58	1,85	1,36	0,15	1,37	1,92	1,10	0,25
70	1,68	2,00	1,32	0,19	1,39	1,83	1,08	0,23
75	1,65	1,91	1,41	0,18	1,30	1,58	1,05	0,15
80	1,62	1,92	1,40	0,16	1,20	1,51	0,98	0,15
85	1,64	1,92	1,36	0,16	1,19	1,52	0,81	0,23
90	1,63	1,87	1,35	0,13	1,20	1,56	0,97	0,17
95	1,61	1,78	1,37	0,14	1,04	1,38	0,72	0,19
100	1,61	1,97	1,36	0,16	1,03	1,50	0,74	0,24

Velocidades de Corte (mm/s)	Louro amazonense - Amostras de 4 mm							
	Extremidade				Meio			
	Média	Máxima	Mínima	D P	Média	Máxima	Mínima	D P
20	3,79	3,96	3,52	0,12	3,87	4,00	3,56	0,13
25	3,60	3,89	3,36	0,18	3,69	3,91	3,42	0,16
30	3,42	3,76	3,13	0,20	3,38	3,79	3,13	0,21
35	2,97	3,21	2,66	0,16	2,97	3,49	2,58	0,27
40	2,82	3,30	2,50	0,26	2,89	3,20	2,62	0,19
45	2,64	3,01	2,41	0,23	2,65	2,90	2,38	0,16
50	2,51	2,86	2,10	0,23	2,58	3,02	2,24	0,22
55	2,44	2,82	2,04	0,23	2,40	2,84	2,09	0,22
60	2,34	2,54	2,01	0,16	2,35	2,77	1,85	0,26
65	2,35	2,61	2,08	0,17	2,27	2,76	1,75	0,33
70	2,32	2,72	2,01	0,17	2,02	2,46	1,48	0,27
75	2,36	2,56	1,97	0,14	1,94	2,34	1,42	0,25
80	2,32	2,61	1,92	0,16	1,96	2,53	1,46	0,28
85	2,31	2,54	2,01	0,16	1,88	2,11	1,60	0,16
90	2,31	2,66	1,96	0,21	1,81	2,12	1,32	0,20
95	2,26	2,54	1,96	0,17	1,76	2,11	1,53	0,17
100	2,31	2,52	2,02	0,15	1,71	2,01	1,39	0,17

Velocidades de Corte (mm/s)	Louro amazonense - Amostras de 3 mm							
	Extremidade				Meio			
	Média	Máxima	Mínima	D P	Média	Máxima	Mínima	D P
30	2,01	2,39	1,54	0,27	2,02	2,52	1,43	0,29
35	1,80	2,35	1,28	0,30	1,97	2,59	1,41	0,30
40	1,69	2,02	1,23	0,25	1,80	2,24	1,36	0,32
45	1,60	2,01	1,11	0,27	1,65	2,26	1,33	0,32
50	1,43	1,67	1,14	0,18	1,56	1,90	1,24	0,20
55	1,42	1,67	1,08	0,19	1,51	2,37	1,04	0,35
60	1,31	1,56	0,96	0,20	1,36	1,57	1,00	0,18
65	1,26	1,60	0,90	0,19	1,34	1,71	0,91	0,29
70	1,31	1,63	0,96	0,21	1,33	1,99	1,00	0,31
75	1,20	1,50	0,95	0,17	1,26	1,85	0,91	0,27
80	1,16	1,43	0,89	0,15	1,28	1,66	0,91	0,22
85	1,06	1,38	0,77	0,16	1,23	1,40	1,00	0,11
90	1,05	1,42	0,78	0,19	1,11	1,43	0,86	0,18
95	1,05	1,42	0,70	0,23	1,08	1,35	0,70	0,21
100	1,17	1,65	0,75	0,25	1,00	1,40	0,67	0,18

Velocidades de Corte (mm/s)	Louro amazonense - Amostras de 2 mm							
	Extremidade				Meio			
	Média	Máxima	Mínima	D P	Média	Máxima	Mínima	D P
75	1,80	1,90	1,64	0,07	1,88	1,95	1,74	0,06
80	1,78	1,86	1,63	0,07	1,80	1,92	1,62	0,10
85	1,78	1,90	1,62	0,08	1,76	1,96	1,57	0,10
90	1,74	1,88	1,59	0,08	1,66	1,85	1,49	0,13
95	1,70	1,87	1,41	0,12	1,67	1,88	1,35	0,16
100	1,71	1,86	1,44	0,12	1,67	1,99	1,24	0,21

APÊNDICE F – Tabela com médias, máximas, mínimas e desvios padrão das profundidades de corte resultante das velocidades testadas em que não houve rompimento total da lâmina, medidas na extremidade e meio das amostras da espécie Tauari (*Couratari oblongifolia*)

Velocidades de Corte (mm/s)	Tauari - Amostras de 5 mm							
	Extremidade				Meio			
	Média	Máxima	Mínima	D P	Média	Máxima	Mínima	D P
20	4,73	4,99	4,35	0,21	4,68	4,96	4,37	0,20
25	4,63	4,93	4,25	0,24	4,66	4,90	4,22	0,22
30	4,40	4,88	3,76	0,35	4,35	4,70	3,89	0,26
35	3,90	4,64	3,34	0,36	3,83	4,36	3,22	0,32
40	3,57	4,16	3,03	0,32	3,58	4,18	3,25	0,30
45	3,45	3,86	3,13	0,23	3,35	3,79	2,83	0,28
50	3,21	3,73	2,80	0,28	3,11	3,36	2,79	0,16
55	3,09	3,48	2,69	0,29	2,89	3,25	2,64	0,21
60	3,12	3,69	2,22	0,38	2,82	3,31	2,38	0,32
65	3,08	3,63	2,38	0,34	2,68	3,03	2,41	0,20
70	3,14	4,12	2,41	0,44	2,64	4,09	2,05	0,50
75	3,14	4,08	2,19	0,49	2,58	3,81	2,04	0,45
80	3,13	4,09	2,45	0,46	2,44	3,75	1,80	0,47
85	3,03	4,22	2,36	0,51	2,34	3,43	1,95	0,38
90	3,11	4,17	2,18	0,49	2,34	3,15	1,90	0,32
95	3,19	4,23	2,50	0,48	2,20	2,99	1,90	0,30
100	3,10	4,15	2,40	0,41	2,20	3,42	1,85	0,41

Velocidades de Corte (mm/s)	Tauari - Amostras de 4 mm							
	Extremidade				Meio			
	Média	Máxima	Mínima	D P	Média	Máxima	Mínima	D P
25	3,82	4,00	3,65	0,11	3,74	3,92	3,54	0,12
30	3,67	4,00	3,49	0,17	3,51	3,97	2,10	0,45
35	3,36	3,86	2,76	0,28	3,33	4,00	3,05	0,25
40	3,05	3,70	2,50	0,34	3,22	3,63	2,65	0,27
45	2,90	3,41	2,45	0,28	3,04	3,52	2,50	0,25
50	2,64	3,18	2,23	0,25	2,87	3,29	2,55	0,21
55	2,46	2,86	2,18	0,20	2,74	3,29	2,26	0,25
60	2,40	2,98	2,06	0,27	2,68	3,03	2,39	0,18
65	2,34	2,80	2,05	0,23	2,54	2,92	2,33	0,20
70	2,39	2,75	2,22	0,16	2,37	2,78	2,00	0,21
75	2,41	2,82	2,05	0,23	2,30	2,69	1,93	0,21
80	2,42	2,89	2,10	0,19	2,28	2,72	1,97	0,22
85	2,43	2,94	2,13	0,22	2,17	2,71	1,76	0,27
90	2,42	3,03	2,09	0,26	2,18	2,64	1,73	0,24
95	2,40	2,84	1,99	0,25	2,09	2,53	1,84	0,18
100	2,34	2,66	2,05	0,22	2,07	2,44	1,65	0,24

Velocidades de Corte (mm/s)	Tauari - Amostras de 3 mm							
	Extremidade				Meio			
	Média	Máxima	Mínima	D P	Média	Máxima	Mínima	D P
30	2,47	3,00	1,89	0,37	2,84	3,00	2,43	0,17
35	2,32	2,67	1,90	0,27	2,63	2,97	2,28	0,22
40	2,11	2,61	1,66	0,27	2,48	2,82	2,05	0,24
45	1,90	2,24	1,50	0,24	2,19	2,67	1,92	0,22
50	1,68	2,08	1,36	0,22	1,99	2,33	1,71	0,19
55	1,57	1,88	1,27	0,17	1,84	2,24	1,58	0,21
60	1,48	1,85	1,16	0,24	1,71	1,98	1,43	0,17
65	1,34	1,68	1,00	0,18	1,62	1,86	1,39	0,15
70	1,26	1,72	1,01	0,21	1,54	1,88	1,32	0,17
75	1,28	1,63	0,93	0,20	1,44	1,73	1,21	0,17
80	1,15	1,45	0,91	0,19	1,40	1,89	1,12	0,22
85	1,16	1,48	0,90	0,19	1,29	1,64	1,06	0,20
90	1,12	1,45	0,88	0,19	1,22	1,40	1,08	0,11
95	1,07	1,33	0,90	0,14	1,14	1,39	0,99	0,12
100	1,06	1,42	0,79	0,19	1,08	1,54	0,85	0,18

Velocidades de Corte (mm/s)	Tauari - Amostras de 2 mm							
	Extremidade				Meio			
	Média	Máxima	Mínima	D P	Média	Máxima	Mínima	D P
75	1,87	2,00	1,70	0,10	1,84	2,00	1,67	0,12
80	1,82	2,00	1,58	0,15	1,78	2,00	1,60	0,13
85	1,71	1,96	1,45	0,16	1,67	1,98	1,41	0,16
90	1,69	1,96	1,48	0,12	1,68	1,88	1,50	0,10
95	1,77	2,00	1,52	0,18	1,66	1,95	1,44	0,13
100	1,69	2,00	1,45	0,17	1,64	1,89	1,46	0,13