

SETSUO IWAKIRI

LABORATÓRIO DE TECNOLOGIA DA MADEIRA - UFPR

A INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS DE PROCESSAMENTO
SOBRE PROPRIEDADES DE CHAPAS DE
PARTÍCULAS DE DIFERENTES ESPÉCIES DE *Pinus*

Tese submetida à consideração da comissão examinadora, como requisito parcial para a obtenção do Título de "Doutor em Ciências - Dr." no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná.

CURITIBA

1989

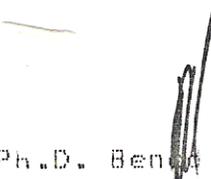
LTM
T
PINUS
1989
160

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
COORDENAÇÃO DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

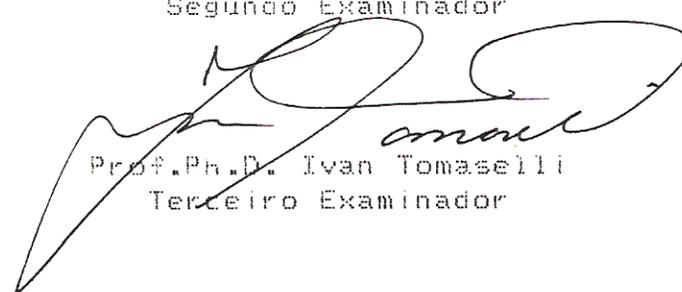
P A R E C E R

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal para realizar a arguição da Tese de Doutorado apresentada pelo candidato SETSUO IWAKIRI, sob o título "A INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS DE PROCESSAMENTO SOBRE PROPRIEDADES DE CHAPAS DE PARTÍCULAS DE DIFERENTES ESPÉCIES DE Pinus" para obtenção do grau de Doutor em Ciências Florestais-Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná. Área de concentração: **TECNOLOGIA E UTILIZAÇÃO DE PRODUTOS FLORESTAIS**, após haver analisado o referido trabalho e arguido o candidato, são de parecer pela "APROVAÇÃO" da Tese completando assim os requisitos necessários para receber o grau e o Diploma de DOUTOR EM CIÊNCIAS FLORESTAIS.

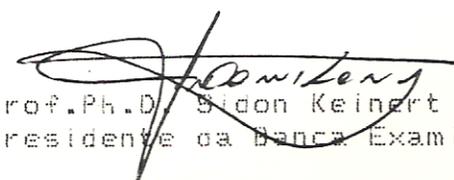
Curitiba, 11 dezembro de 1989


Prof. Ph.D. Benedito Rocha Vital
Primeiro Examinador


Prof. Dr.IVALDO FONTES JANKOWSKY
Segundo Examinador


Prof. Ph.D. Ivan Tomaselli
Terceiro Examinador


Prof. Ph.D. Flávio Felipe Kirchner
Quarto Examinador


Prof. Ph.D. Sidon Keinert Junior
Presidente da Banca Examinadora



As memórias dos
meus avô e pai-Tetsuo

à minha esposa-Marcia
e filhos- William Tetsuo
e Viviane,
pelo apoio e compreensão

à minha mãe
e irmãos

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Sidon Keinert Júnior, pela orientação, apoio e incentivo na realização deste trabalho.

Aos professores Dr. Ivan Tomaselli e Dr. Flávio Felipe Kirchner, pela co-orientação e sugestões apresentadas.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia-INPA, pela concessão e suporte para realização do curso.

À coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, pela vaga e oportunidade concedida.

BIOGRAFIA

SETSUO IWAKIRI, filho de Tetsuo e Misa Iwakiri, nasceu na cidade e província de Miyazaki-Japão, em 05 de maio de 1957.

Realizou os estudos de primeiro grau no Educandário Nossa Senhora Aparecida e no Ginário Estadual de Iporã (1964-1971), em Iporã-PR. Iniciou os estudos de segundo grau no Colégio Estadual Rio Branco (1973), concluindo no Instituto Educacional Positivo (1975), ambos em Curitiba-PR.

Iniciou os estudos de graduação em Engenharia Florestal na Universidade Federal do Paraná em março de 1976, tendo colado grau em janeiro de 1980.

Em março de 1980 ingressou no curso de Mestrado em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná, na área de concentração - Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais, defendendo a dissertação em agosto de 1982.

No período de abril a setembro de 1982, exerceu atividades como professor do Departamento de Produtos Florestais do Instituto de Florestas da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

Em setembro de 1982 ingressou no Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA, onde ocupa cargo de

pesquisador na área de Tecnologia de Produtos Florestais, até a presente data.

Em março de 1986 ingressou no curso de Doutorado em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná, na área de concentração - Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais.

S U M Á R I O

	<u>LISTA DE FIGURAS</u>	ix
	<u>LISTA DE TABELAS</u>	xii
	<u>LISTA DE ABREVIATURAS</u>	xiv
	<u>RESUMO</u>	xv
1	<u>INTRODUÇÃO</u>	01
1.1	OBJETIVOS	03
1.2	JUSTIFICATIVA	04
2	<u>REVISÃO DE LITERATURA</u>	07
2.1	FATORES QUE INFLUENCIAM NA QUALIDADE DAS CHAPAS	07
2.1.1	Densidades da Madeira e da Chapa	07
2.1.2	Umidade das Partículas	09
2.1.3	Geometria das Partículas	11
2.1.4	Resina	14
2.1.5	Condições de Prensagem	16
2.2	PROPRIEDADES DAS CHAPAS DE PARTÍCULAS	19
2.2.1	Módulo de Elasticidade	19
2.2.2	Módulo de Ruptura	21
2.2.3	Ligação Interna	24
2.2.4	Arrancamento de Parafuso	25
2.2.5	Absorção de Água e Inchamento em Espessura ..	26
2.2.6	Taxa de Não Retorno em Espessura	29
2.2.7	Gradiente Vertical de Densidade	31
3	<u>MATERIAIS E MÉTODOS</u>	36

3.1	MATÉRIA PRIMA	36
3.1.1	Coleta do Material	36
3.1.2	Determinação da Densidade da Madeira	38
3.2	MANUFATURA DAS CHAPAS	38
3.2.1	Plano Experimental	38
3.2.2	Obtenção das Partículas	40
3.2.3	Secagem das Partículas	40
3.2.4	Aplicação da Resina	43
3.2.5	Formação do Colchão	43
3.2.6	Prensagem	44
3.2.7	Acondicionamento	44
3.3	DETERMINAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE PROCESSAMENTO E PROPRIEDADES DAS CHAPAS	44
3.3.1	Preparação dos Corpos de Prova	44
3.3.2	Variáveis de Processamento	45
3.3.3	Propriedades das Chapas	47
3.4	ANÁLISE ESTATÍSTICA	51
4	<u>RESULTADOS E DISCUSSÕES</u>	54
4.1	AVALIAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE PROCESSAMENTO	54
4.1.1	Densidades da Madeira e da Chapa	54
4.1.2	Geometria das Partículas	57
4.2	PROPRIEDADES DAS CHAPAS	60
4.2.1	Gradiente Vertical de Densidade	61
4.2.2	Módulo de Elasticidade (MOE)	70
4.2.3	Módulo de Ruptura (MOR).....	80
4.2.4	Ligação Interna (LI)	88
4.2.5	Arrancamento de Parafuso (RAP)	93
4.2.6	Absorção de Água (AA)	102

4.2.7	Inchamento em Espessura (IE)	107
4.2.8	Taxa de Não Retorno em Espessura (TNRE)	113
5	<u>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</u>	118
	<u>SUMMARY</u>	125
	<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	126

LISTA DE FIGURAS

FIGURA

01	ESQUEMA DE DISTRIBUIÇÃO DOS TORETES NA ÁRVORE...	37
02	ESQUEMA DE PREPARAÇÃO DOS BLOCOS PARA OBTENÇÃO DAS PARTÍCULAS	41
03	ESQUEMA ILUSTRATIVO DAS FORMAS DAS PARTÍCULAS...	42
04	DISTRIBUIÇÃO DOS CORPOS DE PROVA NAS CHAPAS	46
05	ESQUEMA DE PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA AVALIAÇÃO DO GRADIENTE VERTICAL DE DENSIDADE ...	49
06	EFEITO DA GEOMETRIA DE PARTÍCULAS SOBRE O GRA- DIENTE VERTICAL DE DENSIDADE (MÉDIA DAS CAMA- DAS)	64
07	EFEITO DAS ESPÉCIES SOBRE O GRADIENTE VERTICAL DE DENSIDADE (MÉDIA DAS CAMADAS)	66
08	MÓDULO DE ELASTICIDADE (MOE) - MÉDIAS AJUSTADAS: A - EFEITO DA GEOMETRIA DE PARTÍCULAS	72
09	MÓDULO DE ELASTICIDADE (MOE) - MÉDIAS AJUSTADAS: B - EFEITO DAS ESPÉCIES	73
10	MÓDULO DE ELASTICIDADE (MOE) - MÉDIAS AJUSTADAS: C- EFEITO DO GRADIENTE VERTICAL DE DENSIDADE ...	74

FIGURA

11	MÓDULO DE RUPTURA (MOR) - MÉDIAS AJUSTADAS: A - EFEITO DA GEOMETRIA DE PARTÍCULAS	82
12	MÓDULO DE RUPTURA (MOR) - MÉDIAS AJUSTADAS B - EFEITO DAS ESPÉCIES	83
13	MÓDULO DE RUPTURA (MOR) - MÉDIAS AJUSTADAS: C - EFEITO DO GRADIENTE VERTICAL DE DENSIDADE..	84
14	LIGAÇÃO INTERNA (LI) - MÉDIAS AJUSTADAS: A - EFEITO DA GEOMETRIA DE PARTÍCULAS	90
15	LIGAÇÃO INTERNA (LI) - MÉDIAS AJUSTADAS: B - EFEITO DAS ESPÉCIES	92
16	RESISTÊNCIA AO ARRANCAMENTO DE PARAFUSO (RAPf)- MÉDIAS AJUSTADAS: A - EFEITO DA GEOMETRIA DE PARTÍCULAS	95
17	RESISTÊNCIA AO ARRANCAMENTO DE PARAFUSO (RAPf)- MÉDIAS AJUSTADAS: B - EFEITO DAS ESPÉCIES	96
18	RESISTÊNCIA AO ARRANCAMENTO DE PARAFUSO (RAPb)- MÉDIAS AJUSTADAS: A - EFEITO DA GEOMETRIA DE PARTÍCULAS	100
19	RESISTÊNCIA AO ARRANCAMENTO DE PARAFUSO (RAPb)- MÉDIAS AJUSTADAS: B - EFEITO DAS ESPÉCIES	101
20	ABSORÇÃO DE ÁGUA (AA) - 2, 24 HORAS - MÉDIAS AJUSTADAS: A - EFEITO DA GEOMETRIA DE PARTÍ- CULAS	104

FIGURA

21	ABSORÇÃO DE ÁGUA (AA) - 2, 24 HORAS - MÉDIAS AJUSTADAS: B - EFEITO DAS ESPÉCIES	105
22	INCHAMENTO EM ESPESSURA (IE) - 2, 24 HORAS - MÉ- DIAS AJUSTADAS: A - EFEITO DA GEOMETRIA DE PAR- TÍCULAS	109
23	INCHAMENTO EM ESPESSURA (IE) - 2, 24 HORAS - MÉ- DIAS AJUSTADAS: B - EFEITO DAS ESPÉCIES	112
24	TAXA DE NÃO RETORNO EM ESPESSURA (TNRE) - MÉDIAS AJUSTADAS: A - EFEITO DA GEOMETRIA DE PARTÍCULAS	115
25	TAXA DE NÃO RETORNO EM ESPESSURA (TNRE) - MÉDIAS AJUSTADAS: B - EFEITO DAS ESPÉCIES	116

LISTA DE TABELAS

TABELA

01	PLANO EXPERIMENTAL	39
02	VALORES MÉDIOS DAS DENSIDADES DA MADEIRA, DA CHA- PA E RAZÃO DE COMPACTAÇÃO	55
03	DIMENSÕES MÉDIAS DAS PARTÍCULAS E RELAÇÕES ENTRE COMPRIMENTO, LARGURA E ESPESSURA	58
04	ÁREA SUPERFICIAL ESPECÍFICA DAS PARTÍCULAS E DIS- PONIBILIDADE DE RESINA POR UNIDADE DE ÁREA	59
05	PROPRIEDADES EXIGIDAS PARA CHAPAS DE PARTÍCULAS (NORMA CS 236-66)	62
06	GRADIENTE VERTICAL DE DENSIDADE - MÉDIA DOS VA- LORES EXTREMOS E DAS CHAPAS	63
07	VALORES MÉDIOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE (MOE)..	71
08	VALORES MÉDIOS DE MÓDULO DE RUPTURA (MOR)	81
09	VALORES MÉDIOS DE LIGAÇÃO INTERNA (LI)	89
10	VALORES MÉDIOS DE RESISTÊNCIA AO ARRANCAMENTO DE PARAFUSO (RAPf-FACE)	94

LISTA DE ABREVIATURAS

MOE	- módulo de elasticidade
MOR	- módulo de ruptura
LI	- ligação interna
RAP	- resistência ao arrancamento de parafuso
AA	- absorção de água
IE	- inchamento em espessura
TNRE	- taxa de não retorno em espessura
IR	- inchamento residual

TABELA

11	VALORES MÉDIOS DE RESISTÊNCIA AO ARRANCAMENTO DE PARAFUSO (RAPb-BORDA)	99
12	VALORES MÉDIOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA (AA) - 2, 24 HORAS	103
13	VALORES MÉDIOS DE INCHAMENTO EM ESPESSURA (IE) - 2, 24 HORAS	108
14	VALORES MÉDIOS DE TAXA DE NÃO RETORNO EM ESPES- SURA (TNRE)	114

RESUMO

Este trabalho foi desenvolvido com o intuito de avaliar as influências de diversas variáveis de processamento, geradas devido às diferentes espécies e tipos de partículas utilizadas, sobre as propriedades das chapas. Entre as propriedades, avaliou-se também os efeitos do gradiente vertical de densidade sobre as propriedades mecânicas das chapas, principalmente sobre o MOE e MOR. As espécies utilizadas foram: *Pinus taeda*, *P. serotina*, *P. glabra* e *P. palustris*, com partículas dos tipos "wafer", "flake" e "sliver". As condições de manufatura das chapas foram: densidade da chapa - 0,75 g/cm³, conteúdo de resina - 8%, umidade das partículas - 5%, temperatura de prensagem - 180°C, tempo de prensagem - 8 minutos, pressão - 40 kg/cm². A densificação da superfície inferior das chapas foi maior que a da superfície superior. As chapas do tipo "sliver" apresentaram menor densificação superficial que as chapas do tipo "wafer" e "flake", apresentando tendência para formato em "M". Não se pode observar influência de diferentes espécies sobre o gradiente vertical de densidade. As chapas do tipo "wafer" apresentaram maior MOE que as chapas dos tipos "flake" e "sliver", devido principalmente ao maior comprimento das partículas e razão de esbeltez. Nada se pode concluir a respeito dos efeitos da razão de compactação sobre estas propriedades. No MOE pode-se observar também o efeito da maior disponibilidade de resina por unidade de área das partículas, devido à menor área superficial específica das mesmas. A remoção de uma e duas camadas superficiais afetou os valores do MOE e MOR, principalmente do primeiro, comprovando a influência do gradiente vertical de densidade sobre as mesmas. A razão de planicidade influenciou apenas no MOE das chapas. A resistência da ligação interna foi maior para chapas com menor razão de compactação. As chapas do tipo "sliver" apresentaram ligação interna superior às chapas dos demais tipos e a causa provável foi a maior densificação da porção média das chapas. A maior disponibilidade de resina por unidade de área das partículas não influenciou nesta propriedade. A maior densificação das camadas influenciou positivamente na RAP-face. As chapas do tipo "sliver" foram as que apresentaram maior AA e IE nos testes de 2 e 24 horas, e a causa provável deve ser a maior área superficial específica das partículas e menor disponibilidade de resina por unidade de área. O inchamento residual das chapas do tipo "wafer" foi menor que o das chapas dos demais

tipos e entre as espécies, o *P. palustris* e *P. serotina* foram as que apresentaram menor e maior inchamento residual, respectivamente, apresentando relações diretas com IE, comprovando o efeito da menor e maior taxa de liberação das tensões de compressão. Todas as chapas produzidas apresentaram valores de propriedades superiores aos valores mínimos exigidos pela norma americana CS 236-66.

1 INTRODUÇÃO

A produção e utilização de produtos particulados está merecendo importância cada vez maior, principalmente, devido a redução gradativa nas quantidades disponíveis da matéria prima e a necessidade de aproveitamento de resíduos florestais e de árvores desqualificadas para uso em outras indústrias.

A redução da madeira em elementos menores como partículas e o seu rearranjo e reconstituição em novos tipos de produtos, altera muitas das características da madeira na sua forma original. A redução ou eliminação da anisotropia, eliminação dos fatores redutores de resistência, tais como, nós e inclinação da grã, e menor variabilidade entre as peças, são algumas das principais características dos painéis em relação a madeira sólida (MARRA²⁸).

As variáveis envolvidas no processo de manufatura das chapas podem ser controladas para se conseguir melhor qualidade possível para diversos tipos de uso. As dimensões e a forma dos elementos de madeira (partículas), a relação entre as densidades da chapa e da madeira, umidade das partículas, conteúdo de resina, além das variáveis inerentes à prensagem, são algumas das principais variáveis enfocadas nas pesquisas realizadas até o momento.

As indústrias de chapas de partículas no Brasil, a maioria localizadas na região Sul do país, têm se utili-

1 INTRODUÇÃO

A produção e utilização de produtos particulados está merecendo importância cada vez maior, principalmente, devido a redução gradativa nas quantidades disponíveis da matéria prima e a necessidade de aproveitamento de resíduos florestais e de árvores desqualificadas para uso em outras indústrias.

A redução da madeira em elementos menores como partículas e o seu rearranjo e reconstituição em novos tipos de produtos, altera muitas das características da madeira na sua forma original. A redução ou eliminação da anisotropia, eliminação dos fatores redutores de resistência, tais como, nós e inclinação da grã, e menor variabilidade entre as peças, são algumas das principais características dos painéis em relação a madeira sólida (MARRA²⁸).

As variáveis envolvidas no processo de manufatura das chapas podem ser controladas para se conseguir melhor qualidade possível para diversos tipos de uso. As dimensões e a forma dos elementos de madeira (partículas), a relação entre as densidades da chapa e da madeira, umidade das partículas, conteúdo de resina, além das variáveis inerentes à prensagem, são algumas das principais variáveis enfocadas nas pesquisas realizadas até o momento.

As indústrias de chapas de partículas no Brasil, a maioria localizadas na região Sul do país, têm se utili-

zado quase que totalmente de matéria prima proveniente de reflorestamento e que tem como espécie predominante o *Pinus taeda*. O tipo de chapas produzido é denominado de "aglomerado", no qual se utilizam partículas pequenas de forma "granular" e tem uso limitado a produção de móveis e produtos afins, principalmente devido a menor resistência mecânica e estabilidade dimensional. Países como EUA e Canadá tem desenvolvidos chapas com partículas maiores, denominadas de "wafer". Essas chapas apresentam maior resistência mecânica e melhor estabilidade dimensional e podem ser utilizadas também para fins estruturais.

A utilização de diferentes espécies pode contribuir para melhorar a qualidade e propriedades das chapas, principalmente devido ao efeito da diferença em densidade entre as espécies, que influem nas razões de compactação para chapas de mesma densidade. Pode significar também, um incentivo à introdução de novas espécies para reflorestamento ou incremento nas áreas já plantadas, para fins de utilização nas indústrias de chapas de partículas, uma vez assegurada a qualidade e propriedades dos produtos finais.

O laboratório de painéis de madeira da Universidade Federal do Paraná vem pesquisando o comportamento das chapas do tipo "wafer" produzidas com várias espécies do gênero *Pinus* da região. Entre as espécies estudadas, as chapas produzidas com o *Pinus patula* tem demonstrado ser uma espécie promissora para utilização em escala industrial. Tanto as propriedades mecânicas como as não mecânicas apresentaram melhores resultados que das outras espécies.

As chapas têm sido fabricadas a diferentes densidades, níveis de resina e umidade das partículas, para analisar as suas influências sobre as propriedades finais das chapas. No recente estudo, MATOS²⁹, analisou os efeitos do ciclo da prensa sobre as chapas do tipo "wafer" de *Pinus taeda*, inclusive com a utilização de parafina para avaliar o comportamento das propriedades de resistência e estabilidade dimensional das chapas. A utilização de 1% de parafina demonstrou ser eficiente, reduzindo o inchamento em espessura e taxa de não retorno em espessura.

Visando dar continuidade ao desenvolvimento de chapas do tipo "wafer" com espécies do gênero *Pinus*, formulou-se para este estudo, utilização de três novas espécies, com geometrias de partículas dos tipos "wafer", "flake" e "sliver", para analisar a influência de diversas variáveis de processamento resultantes, sobre as propriedades das chapas.

1.1 OBJETIVOS

Os principais objetivos deste estudo foram:

- Avaliar as propriedades mecânicas e não mecânicas de chapas de partículas de 4 espécies do gênero *Pinus* (*taeda*, *serotina*, *glabra* e *palustris*), sendo as 3 últimas inéditas;
- Avaliar a influência da razão de compactação sobre as propriedades das chapas de mesma densidade e diferentes geometrias de partículas;
- Estudar os efeitos das diferentes geometrias de partículas (comprimento e largura) e principalmente das

relações comprimento/espessura (razão de esbeltez) e largura/espessura (razão de planicidade), sobre as propriedades das chapas;

- Analisar as influências da área superficial específica das partículas e disponibilidade de resina por unidade de área, resultantes devidas a utilização de diferentes espécies e geometrias de partículas, sobre as propriedades das chapas;
- Analisar as influências de diferentes espécies e geometrias de partículas sobre a formação do gradiente vertical de densidade;
- Estudar a influência do gradiente vertical de densidade sobre as propriedades mecânicas das chapas;
- Avaliar especificamente os efeitos de diferentes densificações das camadas sobre os módulos de elasticidade e de ruptura das chapas;
- Concluir sobre a possibilidade e vantagens de utilização das chapas de *P. serotina*, *P. glabra* e *P. palustris*, produzidas com partículas dos tipos "wafer", "flake" e "sliver".

1.2 JUSTIFICATIVA

A estação experimental do Curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná, instalada no Município de Rio Negro-PR, possui no seu acervo inúmeras espécies plantadas, oriundas de diferentes regiões do mundo.

Entre as espécies do gênero *Pinus*, vale ressaltar a boa adaptação e crescimento apresentadas pelas espécies: *P. serotina*, *P. glabra* e *P. palustris*, o que faz por merecer

uma atenção especial no sentido de estudar a qualidade da madeira dessas espécies, visando seu aproveitamento industrial.

Partindo-se do *P. taeda*, a espécie mais estudada e utilizada pelas indústrias de transformação mecânica e de produtos acabados, o estudo de maior número de espécies desse gênero, representaria uma maior gama de conhecimentos tecnológicos que poderia se juntar aos existentes, no sentido de contribuir científica e tecnologicamente para abrir novas opções para o possível aproveitamento de maior número de espécies para o futuro.

Entre as variáveis inerentes a matéria prima utilizada, a densidade, a forma e as dimensões das partículas de madeira são de suma importância para a qualidade final das chapas de partículas. Diversas propriedades mecânicas e não mecânicas podem ser melhoradas, variando-se a razão de compactação e a geometria de partículas utilizadas. Como exemplo, as chapas produzidas com partículas maiores apresentam inúmeras qualidades superiores às chapas produzidas com partículas menores ou granulares, fabricadas e conhecidas no Brasil como "aglomerado". A possibilidade de utilização de chapas do tipo "wafer", também para fins estruturais, abre caminhos para competir com chapas de madeira compensada em muitas das utilizações. Levando-se em consideração, a flexibilidade em termos de qualidade da matéria prima requerida na produção de chapas do tipo "wafer", quando comparadas às chapas de madeira compensadas, se torna altamente justificável o desenvolvimento da sua tecnologia de produção.

Os efeitos das variáveis de processamento sobre a formação do gradiente vertical de densidade e sua influência

sobre as propriedades das chapas são de grande importância. Portanto, faz-se necessário um estudo mais aprofundado para avaliar o nível de associação existente entre as variáveis de processamento e diferentes perfis do gradiente vertical de densidade e sua influência, principalmente sobre as propriedades de resistência. A maioria dos estudos realizados concentram suas atenções aos fatores que influem na formação do gradiente vertical de densidade, no entanto, poucos analisam detalhadamente os efeitos sobre as propriedades das chapas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 FATORES QUE INFLUENCIAM NA QUALIDADE DAS CHAPAS

2.1.1 Densidades da Madeira e da Chapa

Existem dois fatores principais que controlam a densidade das chapas de partículas, que são a densidade da madeira e a razão de compactação do colchão na prensa. Qualquer alteração num desses fatores, resulta na modificação do outro, se a densidade da chapa é mantida constante (KELLY²¹).

Chapas de partículas de uma determinada densidade, produzidas com espécies de baixa densidade, apresentam maiores resistência à flexão estática e tração perpendicular, embora a resistência ao arrancamento de parafuso, absorção de água e inchamento em espessura sejam pouco afetadas. A razão para tal, está no fato de que um determinado peso de partículas de uma espécie de baixa densidade, ocupa um volume superior do que o mesmo peso de partículas similares de uma espécie de maior densidade. Quando estes colchões de partículas de madeira são comprimidos para dimensões finais da chapa, ocorre um contacto relativo maior para partículas de madeira de baixa densidade, devido a maior taxa de compressão, resultando em melhor adesão entre as partículas. Considerando-se chapas de partículas de média densidade, ocorre a distribuição de quantidade maior de adesivo por unidade de área super-

ficial sobre partículas de madeiras mais densas, no entanto, o maior contacto relativo entre as partículas de madeira menos densa é o fator controlador das propriedades de resistência. Por outro lado, para chapas de partículas de alta densidade, a quantidade de adesivo por unidade de área superficial das partículas passa a ser o fator controlador da resistência da chapa. Portanto, para se obter um dado valor de resistência com madeira de maior densidade, a densidade da chapa deve ser aumentada (MOSLEMI³⁰).

A densidade final da chapa depende não apenas da quantidade de partículas de madeira no colchão, mas também das condições de processamento antes da prensagem, tais como: espécie utilizada, umidade das partículas, conteúdo de resina e outros aditivos. O efeito da espécie sobre as propriedades das chapas é relacionado a densidade da sua madeira e a necessidade de compressão do colchão de partículas para possibilitar um contacto adequado entre as mesmas. A compactação do colchão de partículas a uma densidade média maior que a densidade das partículas de madeira, permite melhor contacto superficial entre as mesmas na chapa produzida. A densidade da madeira é o parâmetro mais importante para determinar a potencialidade de uma dada espécie para manufatura de chapas de partículas (KELLY²¹).

Uma determinada pressão é necessária para consolidação do colchão de partículas em dimensões finais requeridas da chapa, para assegurar melhor ligação entre as partículas. A pressão adequada exigida está relacionada ao valor resultante da razão entre a densidade da chapa e a densidade da madeira. Valores em torno de 1,3 proporcionam uma boa indica-

ção para determinar se uma dada espécie é adequada para produção de chapas de média densidade. Uma solução parcial para utilização de espécies de alta densidade para produção de chapas de média densidade é a mistura com espécies de baixa densidade, aumentando com isso a razão de compactação aos níveis adequados (MALONEY²⁷).

LARMORE²², afirma que para chapas de mesma densidade e dimensões, portanto, mesmo peso do colchão de partículas, a utilização de espécie de menor densidade resultará em volume maior do colchão, que com a espécie de maior densidade, e quando estes colchões são comprimidos às dimensões finais da chapa, ocorrerá melhor contacto relativo entre as partículas para o colchão de maior volume, resultando em melhor ligação entre as partículas.

KLAUDITZ & STEGMANN* citados por KEINERT Jr.¹⁸, apresentam um gráfico relacionando a densidade da chapa e resistência à flexão estática, no qual, observa-se que com a utilização de espécie de maior densidade a densidade da chapa deve ser aumentada para se obter chapas com mesma resistência. Para chapas de mesma densidade, a espécie de menor densidade resultará em maior resistência da mesma, devido a maior razão de compactação.

2.1.2 Umidade das Partículas

O teor de umidade das partículas utilizadas para manufatura das chapas de partículas varia normalmente entre

* KLAUDITZ, W. & STEGMANN, G. *Über die Eignung von pappelholz zur herstellung von holzpanplatten.* Holzforschung, 11: 174-179, 1957.

3 e 6%. A solução aquosa do adesivo aplicado nas partículas eleva o seu teor de umidade e do colchão. O vapor d'água gerado no colchão durante a prensagem a quente, migram a partir da superfície próxima ao prato de aquecimento para o interior da chapa e do centro para as bordas. Umidade excessiva do colchão geralmente requer maior tempo de prensagem devido à ação retardante da umidade sobre a cura do adesivo. Por outro lado, baixo conteúdo de umidade do colchão reduz a transferência de calor da superfície ao miolo (MOSLEMI³⁰).

O conteúdo de umidade do colchão é um fator extremamente crítico não apenas no tempo de prensagem total, mas também, no desenvolvimento do gradiente vertical de densidade. A velocidade de transferência de calor da superfície da chapa para o miolo através da convecção, é mais efetiva na cura do adesivo do que o calor transferido por condução através da madeira e espaços de ar.

A umidade da superfície do colchão reduz a resistência da madeira à compressão. Baixo conteúdo de umidade requer maior pressão para consolidação do colchão e se caracteriza por piores ligações entre as partículas. Por outro lado, alto conteúdo de umidade requer ciclo de prensagem mais longo, para possibilitar a liberação suficiente da umidade contida no interior da chapa (KELLY²¹).

HEEBINK¹³ e STRICKLER³⁸, afirmam também que o gradiente de umidade no colchão influi na transferência de calor ao longo de sua espessura, e o tempo requerido para aquecimento do miolo decresce com o aumento do conteúdo de umidade da superfície do colchão. Segundo os autores, para colchão com conteúdo de umidade homogêneo, os valores ótimos estão entre 11 a 14%.

A umidade excessiva interfere negativamente na reação química de polimerização da resina e reduz também a resistência da madeira a compressão, resultando na maior densificação das camadas superficiais. A densificação excessiva da superfície é acompanhada pela baixa densidade do miolo da chapa. A resistência à flexão estática e tração paralela aumentam com a maior densificação superficial, mas a resistência da ligação interna e ao arrancamento de parafuso é menor devido a menor densidade do miolo (KELLY²¹).

MALONEY²¹, afirma que o conteúdo de umidade e sua distribuição ao longo da espessura do colchão, tem uma grande influência sobre as propriedades das chapas. Por exemplo: maior conteúdo de umidade das superfícies com relação ao miolo do colchão, resulta em maior gradiente de densidade da chapa. Como resultado, algumas propriedades tais como, a resistência à flexão estática aumenta substancialmente, e por outro lado, a resistência da ligação interna é reduzida.

2.1.3 Geometria das Partículas

Das inúmeras variáveis que influem sobre as propriedades mecânicas das chapas de partículas, as dimensões e a forma das partículas são as mais importantes (BODIG & JAYNE³).

A utilização de chapas de partículas para fabricação de móveis requer superfície lisa e bordas compactas, quando as chapas recebem camadas de vernizes ou outros tipos de materiais. A geometria das partículas influi indiretamente no acabamento, colagem e aplicação de produtos laminados nas superfícies das chapas. O tamanho e a forma das partículas determina o comportamento da chapa quanto a absorção de água,

estabilidade dimensional, resistência, aspereza da superfície e sua usinabilidade.

Os elementos dimensionais das partículas de diferentes geometrias são: comprimento, largura e espessura. A razão entre o comprimento e a espessura é denominada de razão de esbeltez e é um parâmetro altamente importante. Essa razão exerce grande influência sobre as características vitais da chapa, tais como: área de contacto entre as partículas na chapa, propriedades mecânicas e consumo relativo de resina. Para razões menores, maior quantidade de adesivo por unidade de área superficial das partículas é necessária, e as razões para tal são:

- as superfícies laterais e as extremidades das partículas mais espessas representam porção significativa da área da qual o adesivo é aplicado, no entanto, contribui muito pouco na ligação entre partículas;
- o adesivo entre as partículas mais espessas, deve também absorver maiores esforços internos da chapa, requerendo para isso, maior quantidade de adesivo para proporcionar resistência adequada das ligações.

Os resultados de várias pesquisas indicam que, para partículas das superfícies das chapas, a razão de esbeltez deve estar em torno de 120 a 200. Partículas com essa razão, são finas e longas, possuindo alto grau de flexibilidade, particularmente quando obtidas de madeiras de espécies de média a baixa densidade. Para o miolo, a razão ideal deve ser em torno de 60 (MOSLEMI³⁰).

O estudo realizado por POST³¹, apresentou as seguintes conclusões a respeito desta relação: a resistência a flexão estática aumenta com o comprimento das partículas até 100 mm; com o aumento na espessura das partículas observa-se uma redução na resistência a flexão; os valores de resistência aumentam com a razão de esbeltez até 300. No entanto, resultados inversos foram obtidos por KEINER Jr. & MATOS¹⁹, onde as chapas de *Pinus pinaster* produzidas com partículas do tipo "flake", com menor razão de esbeltez apresentaram resistência a flexão estática superior às chapas do tipo "wafer", com maior razão de esbeltez.

BRUMBAUGH⁵, analisando o efeito das dimensões das partículas sobre as propriedades das chapas, chegou às seguintes conclusões: o uso de partículas longas e finas reduz o inchamento em espessura, absorção de água e expansão linear; partículas curtas e espessas aumentam a resistência da ligação interna e, finalmente, ele afirma que a razão de esbeltez ideal deve ser de no mínimo 200.

Por outro lado, KIMOTO *et alii**, citados por MOSLEMI³⁰, observaram que a resistência ao arrancamento de parafuso aumenta com a razão de esbeltez até 50, acima deste valor não foi observado aumento na resistência.

Outro parâmetro importante com relação a geometria de partículas é a área superficial das partículas por unidade de peso. Partículas com maior área superficial, apresentam menor espessura e requerem maior quantidade de adesivo para ligações adequadas, comparadas às partículas com menor área

* KIMOTO, R.; ISHIMORI, E.; SASAKI, H. & MAKU, T. Studies on particleboards. Part 6. Wood Res., Kyoto Univ., 32: 1-14, 1964.

superficial por unidade de peso. As chapas produzidas com mesma quantidade de adesivo, com partículas longas e finas, resultam em menores valores de ligação interna, quando comparadas às chapas feitas com partículas curtas e espessas (MOSLEMI³⁰).

2.1.4 Resina

A manufatura de chapas de boa qualidade com menor consumo de resina, é o objetivo primordial dos fabricantes, devido principalmente ao alto custo representado pela mesma.

As resinas mais utilizadas atualmente consiste em polímeros de uréia-formaldeído e fenol-formaldeído. A resina uréica é a mais utilizada para uso interior devido ao menor custo, e a fenólica, a mais adequada para manufatura de chapas para fins estruturais e uso exterior, devido a maior durabilidade e resistência (KELLY²¹).

Todas as pesquisas demonstram claramente que, dentro de uma determinada faixa, chapas produzidas com maior conteúdo de resina apresentam maior resistência. No entanto, a quantidade de resina utilizada deve ser otimizada de acordo com a finalidade de uso e resistência mínima exigida.

A reatividade varia para cada tipo de resina e a temperatura é o parâmetro mais importante a ser controlado na manufatura de chapas. Para as resinas fenólicas, maior tempo de prensagem será necessário que para as resinas uréicas, devido a sua menor reatividade. A velocidade de transferência de calor da superfície para o miolo da chapa depende não só da temperatura dos pratos da prensa, mas também do conteúdo e distribuição da umidade no colchão e a espessura

final da chapa, influenciando sobre o tempo de prensagem necessário para a cura completa da resina ao longo de toda a espessura da chapa (LEHMANN & HEFTY²⁵).

Várias experiências foram feitas para determinar os níveis adequados de resina para a manufatura da chapa:

KIMOTO *et alii** citado por KELLY²¹, afirmam que com o aumento no conteúdo de resina uréica de 10 para 15%, verifica-se apenas uma pequena melhora nas propriedades de resistência e inchamento em espessura das chapas. LEHMANN²³, observou apenas uma leve melhora no MOR, MOE e inchamento em espessura das chapas, com o aumento no conteúdo de resina de 8 para 4%, no entanto, a ligação interna aumentou substancialmente neste intervalo.

HANN *et alii*** , citado por KELLY²¹, verificou maior durabilidade das chapas com o aumento no conteúdo de resina fenólica de 3 para 6%.

KELLY²¹, afirma que o conteúdo de resina baseado no peso seco das partículas, é altamente dependente da geometria de partículas, devido a diferença na área superficial das partículas por unidade de peso. Portanto, cada tipo de partículas, deverá ter a quantidade ótima de resina, considerando-se a qualidade desejada da chapa e aspectos econômicos da produção.

* KIMOTO *et alii*, p. 13.

** HANN, R.A.; BLACK, J.M. & BLOMQUIST, R.F. How durable is particleboard? II. The effect of temperature and humidity. For. Prod. J., 13(11): 169-174, 1963.

Nos estudos realizados com espécies do gênero *Pinus* plantadas no Estado do Paraná, têm sido testados níveis de 2, 4, 6 e 8% de resina.

BRITO⁴, observou para *Pinus taeda*, *P. elliottii* e *P. patula*, melhora nas propriedades mecânicas e inchamento em espessura, com o aumento no conteúdo de resina de 4 para 8%. KEINERT Jr. & MATOS¹⁹, testaram níveis de 2 e 6% de resina para chapas de *Pinus pinaster* e obtiveram resultados superiores tanto nas propriedades mecânicas como nas não mecânicas, com o aumento no conteúdo de resina para 6%. KEINERT Jr.²⁰, num estudo comparativo entre as chapas de 4 espécies de *Pinus*, produzidas aos níveis de 2, 4, 6 e 8% de resina observou que as chapas produzidas com 8% de resina foram superiores que as demais, em todas as propriedades estudadas.

2.1.5 Condições de Prensagem

As variáveis que podem ser controladas na prensagem das chapas de partículas são: tempo de fechamento da prensa, tempo, temperatura e pressão de prensagem.

a) Tempo de fechamento da prensa

O tempo de fechamento da prensa é o tempo requerido desde o contacto inicial do prato da prensa com a superfície do colchão, até atingir a espessura final da chapa e exerce uma grande influência sobre a formação do gradiente vertical de densidade (MALONEY²⁷).

A sua influência sobre o mecanismo da formação do gradiente vertical de densidade será discutido num capítulo posterior e específico desta revisão.

b) Tempo de prensagem

O tempo de prensagem que é o intervalo de tempo dispendido a partir do momento em que o colchão é comprimido à espessura final da chapa, até a abertura dos pratos da prensa, é um dos parâmetros que determina o rendimento do processo produtivo de uma indústria.

De acordo com LEHMANN *et alii*²⁴, o tempo mínimo de prensagem depende principalmente da transferência de calor, que por sua vez, varia conforme a espessura da chapa, temperatura de prensagem e distribuição de umidade no colchão.

O tempo e a temperatura de prensagem são parâmetros correlatos e são controlados para assegurar que a temperatura do miolo atinja o nível requerido para cura da resina, sem submeter a superfície da chapa a temperaturas extremas. O tempo de prensagem deve ser o suficiente para possibilitar a migração do excesso de água para as bordas da chapa até o término da prensagem. Chapas produzidas com a resina curada inadequadamente no miolo, poderá resultar em delaminação após o relaxamento da pressão, porque a pressão de vapor é maior que a resistência da ligação interna da chapa (KELLY²¹).

Para chapas produzidas com madeiras do gênero *Pinus* a nível de laboratório, o tempo de prensagem de 8 minutos tem apresentado resultados satisfatórios (BRITO⁴, MATOS²⁹).

c) Temperatura de prensagem

As principais funções da prensagem a quente na produção de chapas são: plasticização da madeira para reduzir sua resistência à compressão, consolidação do colchão para es-

pressão e densidade desejada e polimerização da resina entre as partículas adjacentes (KELLY²¹).

De acordo com MOSLEMI³⁰, a transferência de calor através da espessura da chapa se processa da seguinte forma: após o contacto entre os pratos da prensa e as superfícies do colchão, estas atingem rapidamente a temperatura dos pratos. A água se evapora e o vapor formado penetra para o interior da chapa. Como a temperatura das camadas mais internas estão abaixo do ponto de ebulição da água, o vapor se condensa, transferindo calor latente de condensação. Em razão do centro da chapa estar a temperaturas menores, o tempo e a temperatura de prensagem devem ser adequados para assegurar que o miolo possa atingir temperatura suficiente para permitir a cura da resina.

HEEBINK *et alii*¹⁴, afirmam que maior temperatura de prensagem permite fluxo mais rápido de calor e permite melhor densificação das camadas mais internas da chapa, resultando em maior resistência das ligações internas e menor resistência a flexão estática.

Segundo STRICKLER³⁸, a taxa inicial de penetração do calor para o centro do colchão, apresenta uma relação direta com o conteúdo de umidade total e superficial do colchão e pressão inicial.

KELLY²¹, relata um decréscimo na pressão máxima requerida para compactação do colchão, com o aumento na temperatura de prensagem, devido a maior plasticidade das partículas de madeira a temperaturas maiores.

BRITO⁴, KEINERT Jr.²⁰ e MATOS²⁹, obtiveram chapas de boa qualidade para espécies do gênero *Pinus*, utilizando temperatura de prensagem de 160 a 180°C, com resina fenólica.

d) Pressão

A função principal da pressão na prensagem é assegurar contacto íntimo entre as partículas, pela compressão e consolidação do colchão até a espessura final da chapa. Quando a espessura final da chapa é atingida, a pressão adicional é desnecessária, podendo inclusive ser reduzida, assegurando apenas a manutenção da espessura final alcançada. A influência que a pressão exerce sobre as propriedades das chapas é relacionada apenas a velocidade de fechamento da prensa e seus efeitos sobre o gradiente vertical de densidade (KELLY²¹).

Segundo MOSLEMI³⁰, maior conteúdo de umidade do colchão permite maior facilidade na compressão das partículas, reduzindo a pressão necessária para a sua consolidação até a espessura final desejada, devido ao efeito da umidade sobre a plasticização da madeira.

O autor afirma também que, se a temperatura da prensa é muito alta, ocorre a cura mais rápida da resina, resultando em maior resistência do colchão à sua consolidação, necessitando de maior pressão para atingir a espessura final da chapa.

A pressão utilizada para manufatura de chapas de partículas de média densidade com madeiras do gênero *Pinus* está na faixa de 35 a 40 kg/cm² (BRITO⁴, MATOS²⁹ e KEINERT Jr.²⁰).

2.2 PROPRIEDADES DAS CHAPAS DE PARTÍCULAS

2.2.1 Módulo de Elasticidade

O módulo de elasticidade (MOE) é um parâmetro que

indica a rigidez de um material submetido a um determinado esforço.

Em geral, MOE e MOR são afetados de forma similar pelas diversas variáveis do processo. Aumento da densidade da chapa, aumenta ambas as propriedades; aumentando a densidade superficial, grau de orientação das partículas e conteúdo de resina, também aumentam tanto o MOR como o MOE (KELLY²¹).

Vários autores relatam a alta correlação existente entre MOR e MOE, entre eles, VITAL *et alii*⁴⁴, obtiveram uma correlação altamente significativa, com coeficiente de determinação de 0,96.

HSE *et alii*¹⁵, encontraram alta correlação entre MOE e a razão de compactação das chapas para 8 espécies de folhas de diferentes densidades, verificando-se um rápido aumento no MOE com o aumento da razão de compactação.

GEIMER *et alii*⁹, afirmam que o tempo de fechamento da prensa influi diretamente sobre o gradiente vertical de densidade, e este, apresenta forte influência sobre o MOE de chapas de mesma densidade.

LEHMANN²⁶ e KEINERT Jr.¹⁸, verificaram uma relação direta entre o MOE e o conteúdo de resina, comprimento das partículas e densidade da chapa. KEINERT Jr.¹⁸, observou também uma relação inversa entre o MOE e a densidade da espécie, para chapas produzidas na mesma densidade.

Segundo BRUMBAUGH⁵, a razão entre o comprimento e a espessura das partículas tem uma relação direta com o MOE, e que esse valor deve ser de no mínimo 200. A maioria dos autores afirmam que a largura das partículas quase não tem

influência sobre o MOE. No entanto, KEINERT Jr.¹⁸, utilizando-se de partículas do tipo "sliver" obtidas com a redução na largura a partir das partículas do tipo "wafer", obteve chapas com menores valores de MOE.

GEIMER *et alii*⁹, afirmam que o efeito do grau de alinhamento das partículas sobre o MOE é similar ao MOR. Para chapas com densidade de 0,70 g/cm³ e com partículas alinhadas paralelamente, apresentam cerca de 2,5 vezes o valor do MOE obtido para chapas com partículas distribuídas ao acaso.

2.2.2 Módulo de Ruptura

O módulo de ruptura (MOR) é uma propriedade muito importante que determina a aplicabilidade da chapa de partículas para uso estrutural. Muitas variáveis de processo e seus efeitos sobre MOR têm sido estudadas e, entre elas, as mais amplamente discutidas são: densidade da chapa, conteúdo de resina, razão de compactação, orientação e configuração das partículas.

Todos os pesquisadores são unânimes em afirmar que o aumento no conteúdo de resina resulta em maiores valores de resistência. Para várias espécies do gênero *Pinus*, BRITO⁴ e KEINERT Jr.²⁰, obtiveram aumentos substanciais nos valores de resistência a flexão estática, com o aumento no conteúdo de resina de 4 para 8%.

Segundo KELLY²¹, a razão de compactação, que é a relação entre a densidade da chapa e a densidade da madeira, influi positivamente no MOR apresentando uma alta correlação.

HSE *et alii*¹⁵, afirmam que na utilização de espécies de diferentes densidades para chapas de mesma densidade, a espécie de menor densidade apresenta maior valor de resistência do que a espécie de maior densidade, devido a maior razão de compactação das chapas produzidas com a primeira.

VITAL *et alii*⁴⁴, utilizando 4 espécies de diferentes densidades, encontraram maiores valores de MOR, com o aumento da razão de compactação de 1,2 para 1,6. A razão de compactação é diretamente proporcional à densidade da chapa para a mesma espécie, ou seja, mesma densidade da madeira. Todos os estudos confirmam que, para a mesma espécie, o aumento na densidade da chapa resulta no aumento do MOR, devido a maior razão de compactação. Conseqüentemente, a razão de compactação é um excelente parâmetro para determinação da correlação entre a densidade da chapa e MOR.

A densidade da camada superficial da chapa exerce forte influência sobre o MOR, devido a maior resistência à flexão oferecida pelas camadas superficiais, em função da sua maior densificação. Conseqüentemente, os valores do MOR são altamente dependentes do gradiente vertical de densidade. Diferentes valores de resistência podem ser obtidos para chapas de mesma densidade, alterando o perfil do gradiente vertical de densidade, através da manipulação das diversas variáveis do processo.

De acordo com STRICKLER³⁸, o maior conteúdo de umidade do colchão aumenta a sua compressibilidade durante o fechamento da prensa, resultando em maior densificação da superfície e maiores valores de MOR.

HEEBINK *et alii*¹⁴, afirmam também que a densificação da camada superficial aumenta com a velocidade de fechamento da prensa, e uma relação direta entre MOR e densidade superficial da chapa é observada.

A influência da geometria das partículas sobre o MOR foi estudada por vários pesquisadores.

SUCHSLAND³⁹, afirma que a resistência à flexão depende da área de compressão relativa das partículas e não da densidade da chapa, portanto, varia em função da geometria das partículas utilizadas.

POST³¹, observou um aumento contínuo no MOR, com o aumento no comprimento das partículas no intervalo de 12,5 mm a 100 mm, sendo que, esse incremento se torna menor para comprimentos acima de 50 mm. Por outro lado, com o aumento na espessura das partículas, observou-se uma redução no MOR. A relação entre o comprimento e a espessura das partículas apresenta maior correlação com o MOR do que o comprimento e a espessura isoladamente. O autor afirma também que o MOR aumenta suave, mas continuamente até o valor máximo desta relação de 300.

BRUMBAUGH⁵, relata que o valor do MOR aumenta com a relação comprimento/espessura das partículas até o valor máximo de 250, permanecendo constante acima deste valor.

Com a orientação das partículas em uma só direção, é possível produzir chapas com resistência a flexão, na direção orientada, de cerca de duas vezes ou mais que chapas com orientação das partículas ao acaso. Quanto maior o grau de orientação, maior será o aumento ou redução da resistên-

cia nas direções orientada e transversais, respectivamente (SOBRAL F³⁵).

2.2.3 Ligação Interna

A resistência da ligação interna é uma propriedade amplamente estudada em todas as pesquisas de chapas de partículas. Quando uma amostra é testada em tração perpendicular, normalmente, ocorre a ruptura na porção média da sua espessura, que corresponde a região de menores densidade, e ligação entre as partículas.

Muitos pesquisadores têm obtido altos valores de ligação interna com aumento na densidade da chapa, conteúdo de resina, tempo e temperatura de prensagem. Maior densificação da camada superficial aumenta a resistência à flexão, no entanto, a conseqüente redução na densidade do miolo resulta em menor ligação interna (KELLY²¹).

RICE & CAREY³², afirmam que tanto a densidade da chapa como o conteúdo de resina influem positivamente na resistência da ligação interna.

STRICKLER³⁸, não encontrou no seu estudo, uma boa correlação entre a densidade do miolo da chapa e a ligação interna. Ele atribui ao conteúdo de umidade do colchão e ciclo da prensa como fatores determinantes desta propriedade.

VITAL *et alii*⁴⁴, não encontraram uma correlação definida entre a ligação interna e a densidade, para chapas de partículas produzidas com a mistura de 4 espécies de folhosas. Para chapas de mesma densidade, eles obtiveram uma redução na ligação interna com o aumento na razão de compac-

tação. Os autores mencionam como a possível causa desta relação, aos maiores danos causados às partículas, em virtude da alta razão de compactação. No entanto, HSE¹⁶, observou um aumento na ligação interna com o aumento na razão de compactação, dentro da faixa de 0,9 a 1,5 para partículas de 75 mm de comprimento, de 9 espécies de folhosas.

Segundo vários pesquisadores, a resistência da ligação interna pode ser melhorada com a utilização de partículas do tipo "sliver", ao invés do tipo "flake", no miolo das chapas de três camadas (GATCHELL *et alii*⁸, STEWART & LEHMANN³⁷, TALBOTT & MALONEY⁴³ e BRUMBAUGH⁵). Ainda sobre o efeito da geometria de partículas, BRUMBAUGH⁵, conclui no seu estudo que chapas produzidas com partículas curtas e espessas, apresentam maior resistência da ligação interna do que chapas produzidas com partículas longas e finas.

2.2.4 Arrancamento de Parafuso

A resistência ao arrancamento de parafuso (RAP), apesar de ser uma propriedade pouco estudada e mencionada nas literaturas, tem uma elevada importância especialmente quando as chapas são utilizadas para fins moveleiros.

MOSLEMI³⁰ e POST³¹, afirmam que o conteúdo de resina é uma das variáveis que influi positivamente na RAP. ACKES² e ECKELMANN⁷, observaram uma leve melhora na RAP, com o aumento da densidade da chapa, enquanto que, NEBDALL*, citado por BRITO⁴, afirma que não existe uma relação definida entre a densidade da chapa e RAP.

* NEBDAL, F. Testing screw-and nail holding in particleboards. Drev. Výskum., 6(1): 19-24, 1961.

No estudo realizado por BRITO⁴, para 3 espécies do gênero *Pinus*, com diferentes níveis de resina e densidade da chapa, não foi observado qualquer influência estatisticamente significativa das espécies, conteúdo de resina e densidade da chapa sobre a resistência ao arrancamento de parafuso.

MATOS²⁹, analisando a influência do ciclo da prensa e da umidade das partículas sobre a RAP, conclui que para partículas com 3 e 5% de umidade e tempo de prensagem de 8 minutos, as chapas produzidas com tempo de fechamento da prensa de 35 segundos, apresentaram RAP superior às chapas prensadas com tempo de fechamento de 100 segundos.

2.2.5 Absorção de Água e Inchamento em Espessura

Os efeitos da umidade sobre as chapas de partículas é de suma importância no tocante às suas propriedades e usos finais, principalmente quando se trata de uso estrutural e em ambiente externo.

O inchamento em espessura devido ao efeito da umidade, pode ser afetado por inúmeras variáveis de processo, tais como: espécies, geometria de partículas, densidade da chapa, conteúdo de resina e condições de prensagem. O inchamento em espessura pode ser controlado ou minimizado pela manipulação destas variáveis e através de alguns métodos de tratamentos especiais (HALLIGAN¹²).

A absorção de água e inchamento em espessura varia também de acordo com as condições de testes, e os elementos que influem diretamente sobre estas propriedades são: umidade, tempo e temperatura de exposição.

Com base no comportamento da madeira sólida, a quantidade de água absorvida deve ser diretamente proporcional a densidade da chapa, portanto, espera-se que chapas de maior densidade inchem-se proporcionalmente mais que chapas de menor densidade. No entanto, SUCHSLAND⁴¹, observou para chapas de partículas, um baixo coeficiente de correlação ($r = 0,31$), entre o inchamento em espessura e a densidade da chapa. Vários autores citados por KELLY²¹, também mencionam uma relação contraditória a respeito desta correlação.

VITAL *et alii*⁴⁴, estudaram o comportamento das chapas de diferentes densidades utilizando método de imersão em água por 24 horas. Os autores concluíram que a absorção de água apresenta alta correlação com a densidade da chapa. Por outro lado, chapas com maior razão de compactação (1,6), apresentaram menor absorção de água que chapas com menor razão de compactação (1,2). Eles atribuíram à redução na porosidade e aumento na quantidade de material, como causadores da menor taxa de absorção de água.

HALLIGAN¹², observou uma relação linear entre chapas de densidade 0,4 e 0,8 g/cm³ e inchamento em espessura, quando expostas às condições de alta umidade relativa. Com a imersão em água, também se verificou maior inchamento em espessura com aumento na densidade da chapa, mas a relação não foi linear.

VITAL *et alii*⁴⁵, afirmam que melhor estabilidade dimensional das chapas de partículas pode ser conseguida com a utilização de partículas finas e para chapas de menor densidade.

SUCHSLAND⁴¹, relata que a geometria de partículas é um dos parâmetros mais importantes no controle da estabilidade dimensional das chapas.

Num estudo para avaliar o comportamento das chapas de diferentes espécies do gênero *Pinus* (*patula*, *taeda*, *pinaster* e *elliottii*), KEINERT Jr.²⁰, observou menor inchamento em espessura para chapas produzidas com *Pinus patula*, justamente a espécie de menor densidade e portanto, maior razão de compactação. Por outro lado, KEINERT Jr.¹⁸, não obteve diferença estatisticamente significativa no inchamento em espessura entre o *E. grandis* e *E. robusta*, com densidades da madeira de 0,50 e 0,59 g/cm³, respectivamente.

As literaturas disponíveis são praticamente unânimes em afirmar que melhor estabilidade dimensional é obtida com chapas produzidas de partículas finas, que de partículas espessas. A explicação se baseia no fato de que a menor massa de madeira em cada partícula e aumento no número de interfaces entre as partículas possibilita melhor dispersão do inchamento higroscópico para os espaços interpartículas. Menor grau de influência é atribuído ao comprimento das partículas sobre o inchamento. Geralmente, as partículas de maior comprimento reduz o inchamento em espessura (KELLY²¹). HALLIGAN¹², afirma também que com a utilização de partículas mais longas, pode-se obter chapas com melhor estabilidade dimensional.

LEHMANN²⁶, estudou o efeito de três níveis de resina fenólica (3, 6, 9%), sobre o inchamento em espessura e observou uma redução acentuada no inchamento, com o aumento do nível de resina de 3 para 6%. Na faixa de 6 para 9%, a redução

foi menor. O autor afirma também que, o aumento no conteúdo de resina e adição de parafina, melhora não só a estabilidade dimensional, mas também, as propriedades de resistência e a durabilidade da chapa nas condições de exposição a alta umidade relativa. Resultados similares foram obtidos também por MATOS²⁹, com a utilização de 1% de parafina nas chapas do tipo "wafer" de *Pinus taeda*. Alguns outros autores, relatam que quantidade de parafina acima de 1%, interfere na cura da resina e reduz as propriedades de resistência das chapas.

2.2.6 Taxa de não Retorno em Espessura (Springback)

A exposição da chapa num ciclo de alta e baixa umidade relativa, em que ocorre primeiro o inchamento e depois a contração, resulta em inchamento residual devido a liberação das tensões de compressão impostas às chapas, e é denominado de taxa de não retorno em espessura (SUCHSLAND⁴¹, HUIJANEN¹⁷). Este efeito pode ser reduzido ou eliminado através de tratamentos especiais como pós-vaporização e pós-aquecimento das chapas, embora estes métodos tenham aplicações industriais limitadas.

A taxa de não retorno em espessura (TNRE) ou inchamento residual (IR), é maior que da madeira sólida devido a liberação das tensões residuais de compressão impostas às chapas durante a prensagem. A redução no conteúdo de umidade que ocorre quando o colchão de partículas é submetido à prensa quente, reduz a plasticidade da madeira e resulta em condições semipermanentes de tensões de compressão. Com a exposição da chapa em condições de alta umidade relativa,

ocorre a plasticização da madeira permitindo que estes esforços sejam liberados, resultando em inchamento no sentido da espessura. A variação total em espessura é devida também a adsorção de água pelas partículas de madeira. Com a posterior secagem, resultará na contração em espessura, equivalente somente à contração das partículas de madeira. O inchamento devido a liberação das tensões de compressão não será recuperado resultando no inchamento residual (KELLY²¹).

As influências de algumas variáveis sobre o inchamento residual são mencionadas por vários pesquisadores.

CHILDS*, citado por KELLY²¹, observou uma relação direta entre o inchamento residual e a densidade da chapa, e relação inversa com o conteúdo de resina. O autor afirma também que a largura das partículas não apresenta qualquer influência sobre o inchamento residual.

POST³¹, relata no seu trabalho que o inchamento residual é maior para partículas de maior espessura e menor para partículas de maior comprimento.

No estudo realizado por MATOS²⁹, para chapas produzidas com *Pinus taeda*, às diferentes condições de prensagem, foi observada uma forte influência da umidade das partículas e presença de parafina, sobre o inchamento residual. O autor relata que com a aplicação de 1% de parafina, o inchamento residual é reduzido.

* CHILDS, M.R. The effect of density, resin content and chip width on springback and certain other properties of dry formed flat pressed particleboard. Raleigh, North Carolina State University, Dept. of Wood and Pap. Sci., 1956. MS. Thesis.

LEHMANN & HEFTY²⁵, estudaram a influência das condições de atomização da resina sobre o inchamento residual. Após a exposição das chapas no ambiente com umidade relativa de 90%, os autores observaram que as chapas produzidas pela aplicação da resina com atomização fina, resultaram em menor inchamento residual que aquelas produzidas por atomização com gotículas maiores.

2.2.7 Gradiente Vertical de Densidade

A densidade da chapa de partículas varia ao longo de sua espessura e é altamente influenciada pela geometria de partículas, distribuição da umidade no colchão, tempo de fechamento da prensa, temperatura da prensa, reatividade da resina e resistência a compressão das partículas de madeira. O gradiente vertical de densidade influi substancialmente em muitas das propriedades de resistência, e a flexão estática é a propriedade mais afetada pelos diferentes perfis do gradiente (KELLY²¹).

Segundo SUCHSLAND⁴⁰, o gradiente vertical de densidade surge a partir da influência da temperatura e umidade sobre a resistência das partículas de madeira à compressão perpendicular. Alta temperatura de prensagem e maior umidade do colchão reduz drasticamente a resistência da madeira à compressão. No entanto, o gradiente vertical de densidade se forma devido a distribuição desuniforme da umidade e calor durante a operação de prensagem.

HEEBINK *et alii*¹⁴, estudando os efeitos de diversas variáveis sobre a formação do gradiente vertical de densida-

de, concluíram que o conteúdo de umidade e sua distribuição no colchão, foram as variáveis mais importantes. A temperatura e a velocidade de fechamento da prensa também são mencionadas como variáveis que contribuem na sua formação.

Chapas de partículas homogêneas prensadas a diferentes velocidades de fechamento resultam em diferentes gradientes verticais de densidade, devido aos efeitos da transferência de calor e umidade ao longo da espessura do colchão e sobre a resistência à compressão das várias camadas de partículas. O tempo de fechamento da prensa depende diretamente da pressão aplicada ao colchão de partículas. Com alta pressão, a espessura final da chapa será atingida antes que calor suficiente seja transferido dos pratos da prensa para o interior do colchão. Devido às camadas superficiais estarem quente, e portanto, com menor resistência à compressão do que as camadas internas, a compressão da estrutura da madeira nas camadas superficiais ocorrerá antes que nas camadas mais internas, resultando em maior densificação das camadas superficiais. Por outro lado, com a aplicação de menor pressão, a velocidade de fechamento será menor, permitindo que as camadas internas atinjam maiores temperaturas e menor resistência a compressão, antes do fechamento total, resultando em menor gradiente vertical de densidade entre as camadas externas e as internas (KELLY²¹).

GERARD¹⁰, atribui aos diferentes esforços de compressão exercidos sobre as camadas de partículas, como responsáveis pela formação do gradiente vertical de densidade. Segundo o autor, as partículas mais próximas à superfície são

mais comprimidas que as partículas mais internas durante a prensagem, resultando na maior densificação superficial.

MAKU *et alii**, citados por KELLY²¹, afirmam que o gradiente vertical de densidade é formado durante o fechamento da prensa, pelo processo de transferência de calor e distribuição de umidade no sentido da espessura do colchão. STRICKLER³⁸, conclui no seu estudo que com maior teor de umidade das camadas externas do colchão com relação às camadas mais internas, resulta em transferência de calor mais rápida para o miolo da chapa.

SMITH³⁴, afirma que o tempo de fechamento da prensa influi também na forma do perfil do gradiente vertical de densidade. Com menor tempo de fechamento resultará num perfil com a forma de "U", enquanto que, com maior tempo de fechamento, o perfil passa a ter forma de "M". O autor afirma ainda que, para chapas do tipo "wafer", é recomendável a utilização de menor tempo de fechamento, para proporcionar maior resistência às chapas. Segundo HEEBINK¹³, com o tempo de fechamento extremamente rápido (15 seg), ocorrerá maior densificação superficial. Com tempo maior, a camada superficial terá menor densificação, aumenta rapidamente até atingir o valor máximo a cerca de 2,4 mm da superfície, diminuindo a seguir até o centro da chapa.

De acordo com KELLY²¹, maior tempo de fechamento da prensa pode causar polimerização da resina, antes de ocorrer contacto adequado entre as partículas e como resultado, as

* MAKU, T.; HAMADA, R. & SASAKI, H. Studies of particleboard. Part 4. Temperature and moisture distribution in particleboard during hot pressing. Wood Res., Kyoto Univ., 21: 34-50, 1959.

ligações entre as superfícies das partículas será drasticamente reduzida, comprometendo a resistência à flexão estática.

Com relação a influência de espécies e geometria de partículas no gradiente vertical de densidade, HEEBINK *et alii*¹⁴, concluem no seu estudo que essas variáveis apresentam efeitos apenas secundários sobre o gradiente vertical de densidade. MAKU *et alii**, citados por KELLY²¹, relatam que as partículas do tipo granular permitem maior rapidez no movimento de água do centro para as bordas da chapa, do que em partículas do tipo "flake", e que a taxa de aumento inicial da temperatura do miolo é aproximadamente a mesma para os dois tipos de partículas ao mesmo conteúdo de umidade. Outra observação feita é de que provavelmente as partículas do tipo granular apresentam maior resistência a compressão do que as partículas do tipo "flake", sendo mais difícil a compressão do colchão para sua consolidação. No entanto, os autores não mencionam suas influências diretas sobre a formação do gradiente vertical de densidade.

Como um método alternativo, SHEN & CARROLL³³, analisaram a correlação entre a resistência da linha de cola determinada através do método de cisalhamento por torção e o gradiente vertical de densidade. O coeficiente de correlação obtido de 0,89, foi considerado satisfatório e a utilização deste método pode se tornar atrativa, face a maior dificuldade na determinação da densidade das camadas para obtenção do perfil do gradiente vertical de densidade.

* MAKU *et alii*, p. 33.

Em síntese, como foram comentados em capítulos anteriores, com a manipulação de diversas variáveis do processo, pode-se alterar o perfil do gradiente vertical de densidade, de maneira que ocorra maior densificação superficial, obtendo-se assim chapas com maior resistência a flexão estática. Para chapas de mesma densidade média, a maior densificação superficial é acompanhada de menor densificação do miolo, resultando em menor resistência da ligação interna. PLATH & SCHMITZER* citado por KELLY²¹, observaram uma alta correlação entre o gradiente de densidade e ligação interna. MATOS²⁹, obteve maior resistência ao arrancamento de parafuso para chapas com maior densificação superficial, em consequência do menor tempo de fechamento da prensa. O autor observou também que a densidade das camadas mais internas não apresenta uma correlação acentuada com a ligação interna. Para MOE e MOR, a maior densificação superficial contribuíram para obtenção de maiores valores.

* PLATH, L. & SCHMITZLER, E. The density profile, a criterion for evaluating particleboard. Holz Roh-Werkst., 32(11): 443-449, 1974.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATÉRIA PRIMA

O material utilizado neste estudo foram quatro espécies do gênero *Pinus*: *taeda*, *serotina*, *glabra* e *palustris*, com 21 anos de idade, provenientes de plantios localizados na estação experimental da Escola de Florestas da Universidade Federal do Paraná, no Município de Rio Negro, Estado do Paraná.

Os diâmetros e alturas médias das árvores utilizadas foram:

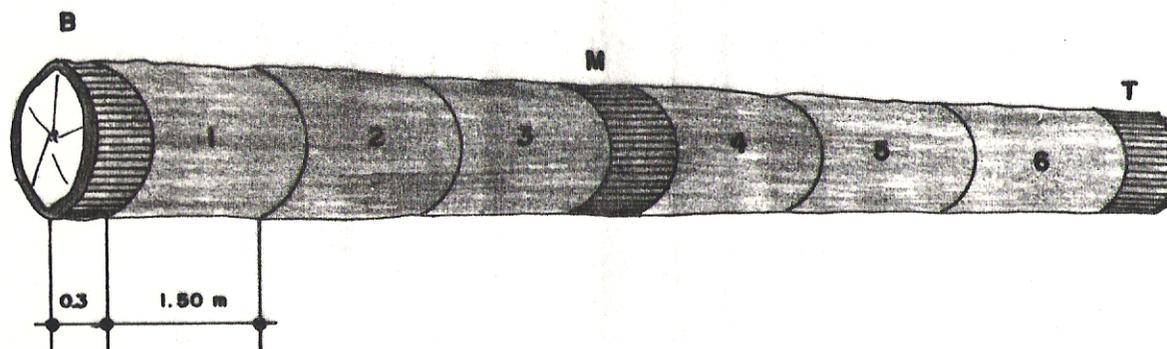
<i>Pinus taeda</i> :	28,3 cm e 25,9 m
<i>Pinus serotina</i> :	22,2 cm e 22,6 m
<i>Pinus glabra</i> :	24,6 cm e 21,3 m
<i>Pinus palustris</i> :	21,2 cm e 21,8 m

3.1.1 Coleta do Material

Foram coletadas aleatoriamente cinco árvores para as espécies: *P. serotina*, *P. glabra* e *P. palustris* e três árvores para a espécie *P. taeda*, por ser esta espécie, já estudada amplamente aos níveis de laboratórios e indústrias.

Conforme ilustrado na Figura 01, cada árvore abatida, foi seccionada em 6 toretes de 1,5 m de comprimento, para produção de partículas e 3 toretes de 0,3 m, localizados na

FIGURA 01: ESQUEMA DE DISTRIBUIÇÃO DOS TORETES NA ÁRVORE



Codificação:

Espécie: T=taeda, S=serotina, G=glabra, P=palustris

Árvore: 1, 2, , 5

Torete maior: 1, 2, , 6

Torete menor: B=base, M=meio, T=topo

base, meio e topo do tronco, para a determinação da densidade das espécies.

Os toretes foram devidamente codificados e transportados até o curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná, onde se procedeu aos trabalhos de laboratório.

3.1.2 Determinação da Densidade da Madeira

A densidade da madeira para cada espécie foi determinada pelo método estereométrico, a 12% de umidade, para corpos de prova com dimensões nominais de 2,5 x 2,5 x 10,0 cm, em número de 3 para cada torete de 0,3 m. Os corpos de prova foram retirados de 3 diferentes alturas do tronco (base, meio e topo) e 3 diferentes posições de cada torete, no sentido medula-casca.

3.2 MANUFATURA DAS CHAPAS

3.2.1 Plano Experimental

O plano experimental formulado para este estudo está apresentado na Tabela 01.

Foram manufaturadas um total de 96 chapas, para 4 espécies com 3 diferentes geometrias de partículas, sendo 8 chapas para cada um dos 12 tratamentos totais. Cada repetição teve sub-amostras em números equivalentes a quantidade de corpos de prova utilizados para cada propriedade estudada. As 8 chapas por tratamento foram divididas em 2 lotes de 4 chapas, sendo cada lote, destinado ao estudo de determinadas

TABELA 01: PLANO EXPERIMENTAL

Temperatura:	180°C
Pressão:	40 kg/cm ²
Tempo fechamento:	45 segundos
Tempo prensagem:	8 minutos
Umidade partículas:	5 %
Conteúdo resina:	8 %
Densidade chapa:	0,75 g/cm ³
Espécie:	<i>Pinus taeda</i> , <i>P. serotina</i> , <i>P. glabra</i> , <i>P. palustris</i>
Geometria partículas:	wafer, flake, sliver
Nº repetições:	8 chapas/tratamento

propriedades. Este procedimento foi adotado devido às dimensões reduzidas das chapas e grande número de corpos de prova requeridos.

3.2.2 Obtenção das Partículas

Os toretes de 1,5 m de comprimento foram seccionados em discos de 7,5 cm de espessura, os quais, foram reduzidos em blocos com as dimensões compatíveis com a capacidade do picador, conforme ilustrado na Figura 02.

As partículas foram geradas nas formas de "wafer" com as dimensões nominais de 0,07 cm de espessura e 3,6 cm de comprimento; "flake" com 0,07 cm de espessura e 1,9 cm de comprimento e "sliver" com as mesmas dimensões nominais do "flake", com a largura reduzida através do moinho de martelo. Portanto, a espessura das partículas foram mantidas constantes para os três tipos, variando apenas o comprimento e a largura das mesmas (Figura 03).

Posteriormente, as partículas de cada geometria foram homogeneizadas por espécie, de modo a alcançar a representatividade da amostragem de 5 árvores por espécie.

3.2.3 Secagem das Partículas

As partículas foram secas em estufa com circulação de ar forçada, à temperatura de 80°C, até atingir o conteúdo de umidade de 5%.

O controle do conteúdo de umidade das partículas foi feito com medições periódicas em amostras de 5 g, retiradas ao acaso, no aparelho a base de infra-vermelho. Após atingir

FIGURA 02: ESQUEMA DE PREPARAÇÃO DOS BLOCOS PARA OBTENÇÃO DAS PARTÍCULAS

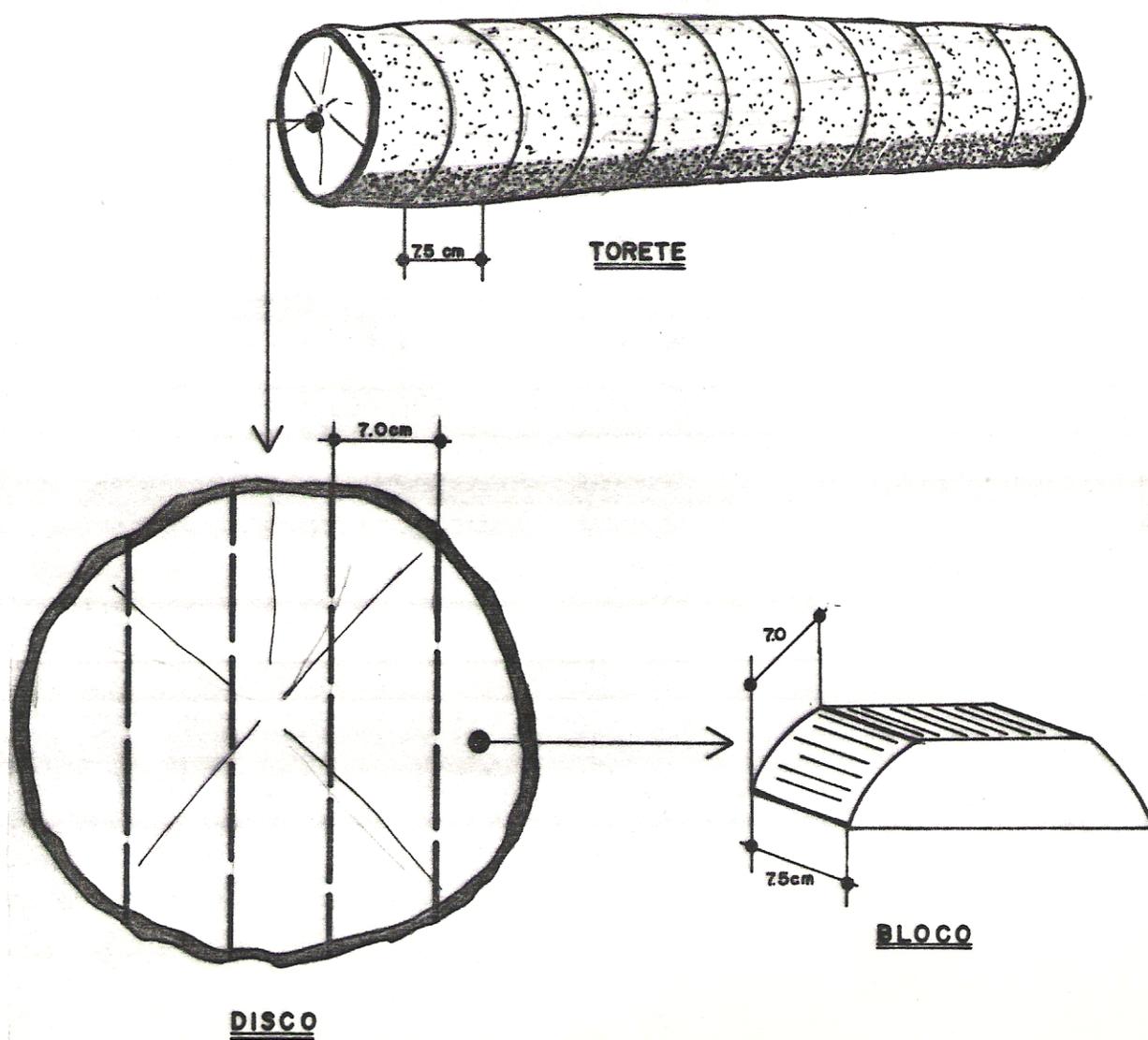
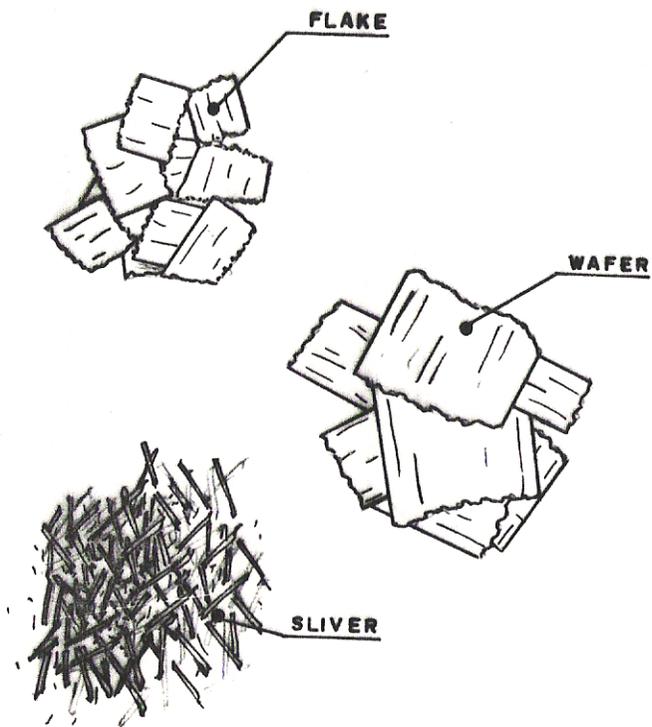


FIGURA 03. ESQUEMA ILUSTRATIVO DAS FORMAS DAS PARTÍCULAS



o conteúdo de umidade de 5%, as partículas foram peneiradas para a eliminação de "finos" e acondicionadas em embalagens plásticas para manutenção do conteúdo de umidade atingido.

3.2.4 Aplicação da Resina

Foi determinada inicialmente a quantidade de partículas a 5% de umidade necessária por chapa, de acordo com as dimensões finais da chapa de 50 x 55 x 1,3 cm e densidade de 0,75 g/cm³.

A resina utilizada foi fenol-formaldeído, em percentual de 8% base peso seco das partículas.

As características da resina utilizada foram as seguintes:

- teor de sólido: 48,46%;
- viscosidade: 722,5 cp;
- pH: 11,5.

A quantidade pré-pesada de partículas para uma chapa foram colocadas no tambor rotativo e a resina foi aplicada sobre as partículas, através de um bico aspersor localizado no interior deste tambor, de modo a permitir uma distribuição uniforme da resina sobre as superfícies de todas as partículas.

3.2.5 Formação do Colchão

Após a aplicação da resina, as partículas foram distribuídas aleatoriamente numa caixa formadora com as dimensões de 50,0 x 55,0 cm, colocada sobre uma lâmina de aço. Ao atingir a quantidade pré-determinada para uma chapa, as par-

tículas foram pré-prensadas manualmente para melhor acomodação das mesmas. A seguir, a caixa formadora foi retirada, colocando-se outra lâmina de aço sobre o colchão formado e duas barras de ferro de 1,3 cm, para o controle da espessura final da chapa.

3.2.6 Prensagem

O colchão de partículas foi consolidado à espessura final da chapa, através de prensagem à quente, conforme a temperatura, tempo de fechamento, tempo de prensagem e pressão definidos no plano experimental (Tabela 01).

3.2.7 Acondicionamento

Após o término da prensagem, as chapas foram retiradas imediatamente, codificadas conforme os tratamentos, pesadas, esquadrejadas e levadas para a sala de climatização com a temperatura de $20 \pm 1^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa de $65 \pm 3\%$, onde permaneceram até atingir a umidade de equilíbrio com esse ambiente, em torno de 12%.

3.3 DETERMINAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE PROCESSAMENTO E PROPRIEDADES DAS CHAPAS

3.3.1 Preparação dos Corpos de Prova

Após o acondicionamento das chapas ao conteúdo de umidade em torno de 12%, foram efetuados os cortes para retirada dos corpos de prova para os diversos testes estabelecidos neste estudo.

As quantidades, dimensões e localizações dos corpos de prova dentro de cada chapa estão ilustrados na Figura 04.

Os métodos de ensaios dos corpos de prova foram baseados na norma americana ASTM D-1037.

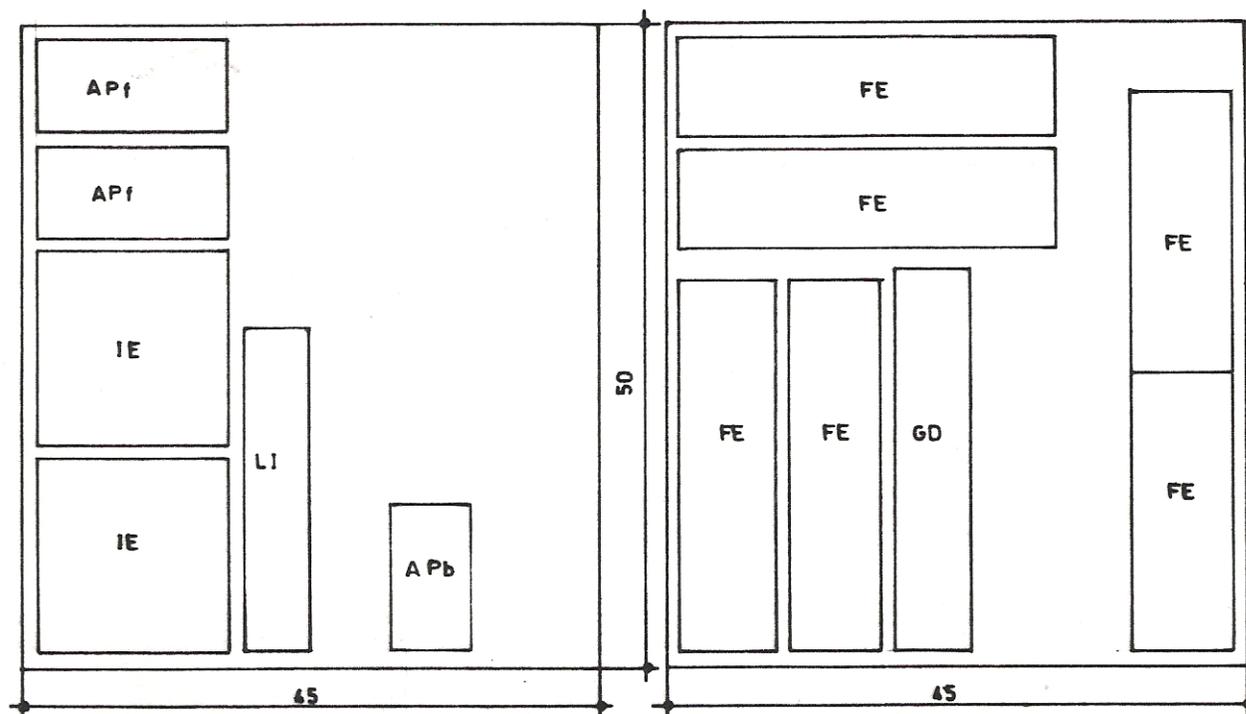
3.3.2 Variáveis de Processamento

Neste estudo, foram definidas e avaliadas as seguintes variáveis de processamento: razão de compactação, razão de esbeltez, razão de planicidade, área superficial específica das partículas, disponibilidade de resina por unidade de área das partículas, para cada espécie e geometria de partículas.

Para possibilitar a determinação destas variáveis, os seguintes elementos foram mensurados: densidade da madeira de cada espécie, densidade média das chapas de cada tratamento, dimensões médias (espessura, comprimento, largura) das partículas de cada geometria em amostras coletadas ao acaso, num conjunto de 4 espécies mescladas.

- a) A razão de compactação foi determinada para cada espécie e geometria de partículas, através da relação entre as densidades da chapa e da madeira;
- b) As razões de esbeltez e de planicidade foram obtidas pelas relações entre o comprimento e a espessura, e entre a largura e a espessura das partículas, respectivamente;
- c) A área superficial específica das partículas para cada espécie e geometria de partículas foi deter-

FIGURA 04 : DISTRIBUIÇÃO DOS CORPOS DE PROVA NAS CHAPAS



Escala 1:3

Legenda:

- FE : flexão estática, para corpos de prova com 3 diferentes espessuras e comprimentos;
- GD : gradiente vertical de densidade;
- LI : ligação interna;
- IE : absorção de água, inchamento em espessura e taxa de não retorno em espessura;
- APf: arrancamento de parafuso (face);
- APb: arrancamento de parafuso (borda).

minada através da fórmula citada por MOSLEMI³⁰:

$$AS = \frac{2 \cdot (E.L + L.C + E.C)}{E.L.C. \cdot dm}$$

onde:

AS: área superficial específica das partículas
(cm²/g);

E: espessura média (cm);

L: largura média (cm);

C: comprimento médio (cm);

dm: densidade da madeira (g/cm³).

- d) A disponibilidade de resina por unidade de área foi calculada com base no conteúdo de resina aplicado por chapa, fazendo-se a extrapolação para 1 grama de partículas e a área superficial específica corresponde.

3.3.3 Propriedades das Chapas

As propriedades mecânicas e não mecânicas avaliadas neste estudo foram: gradiente vertical de densidade, módulo de elasticidade, módulo de ruptura, ligação interna, resistência ao arrancamento de parafuso na face e na borda da chapa, absorção de água 2-24 horas, inchamento em espessura 2-24 horas e taxa de não retorno em espessura.

a) O gradiente vertical de densidade foi determinado para cada chapa, em corpo de prova com dimensões iniciais de 6 x 35 x 1,3 cm, retirado da parte central da chapa.

Os corpos de prova foram serrados ao meio no sentido da largura e colados pelas superfícies maiores, de forma a

localizar as superfícies superior e inferior da chapa na mesma posição do corpo de prova, com as dimensões finais de 2,8 cm de largura, 30 cm de comprimento e 2,6 cm de espessura (Figura 05).

Mediu-se as dimensões e peso iniciais de cada corpo de prova, e a seguir, retirou-se camadas sucessivas de ± 1 mm, a partir da superfície superior até atingir o miolo da chapa de $\pm 6,5$ mm, medindo-se a espessura e o peso após cada camada retirada. O número de camadas retiradas foram de 6, até atingir o miolo da chapa.

Para a superfície inferior, repetiu-se o mesmo procedimento.

A densidade de cada camada retirada (D_c) foi calculada através da seguinte fórmula:

$$D_c = \frac{P_1 - P_2}{(E_1 - E_2) \cdot \text{largura} \cdot \text{comprimento}}$$

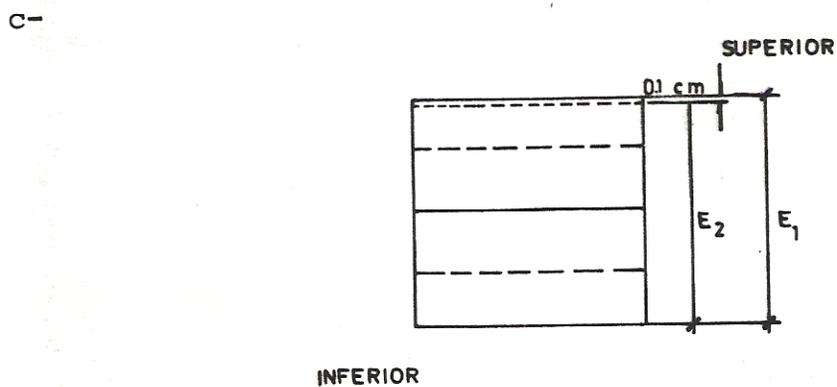
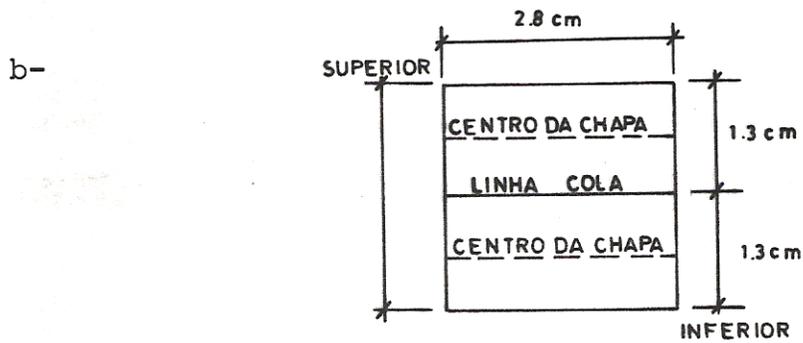
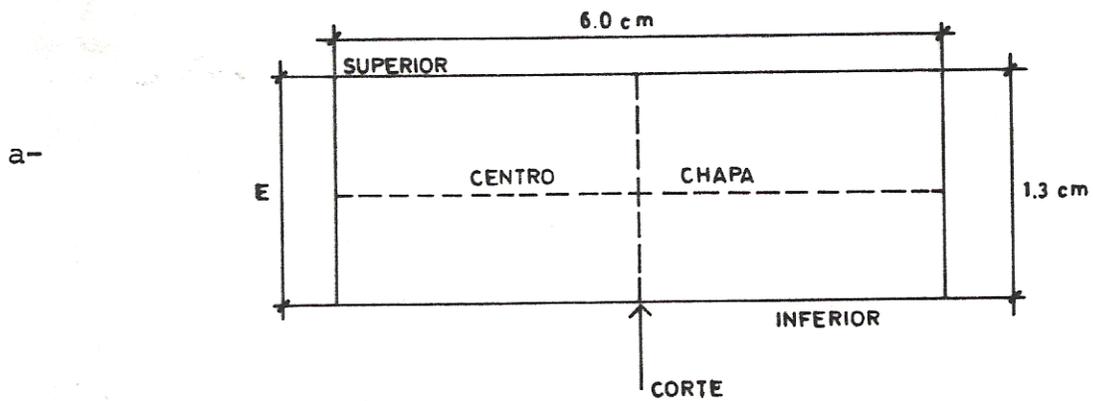
onde:

$P_1 - P_2$: diferença de peso do corpo de prova entre duas passagens;

$E_1 - E_2$: diferença em espessura entre duas passagens.

Os perfis do gradiente vertical de densidade foram traçados para as espécies individuais, dentro de cada geometria de partículas e para geometrias individuais, dentro de cada espécie. Os pontos limites representativos de cada camada foram obtidos pela média das 4 chapas de cada tratamento. A posição relativa da camada retirada em relação à espessura original da chapa foi obtida através da fórmula a seguir:

FIGURA 05 : ESQUEMA DE PREPARAÇÃO DE CORPOS DE PROVA PARA AVALIAÇÃO DO GRADIENTE VERTICAL DE DENSIDADE



$$Pr = \left(\frac{E - E_1}{E_1} \cdot 100 \right) / 2$$

onde:

Pr = posição relativa da camada (%)

0% (para a superfície);

50% (para o miolo);

E = espessura original da chapa;

E_1 = espessura do corpo de prova após retirada da camada.

b) Os módulos de elasticidade e de ruptura em flexão estática foram determinados para 3 diferentes espessuras de chapas:

- corpos de prova com espessura original da chapa;
- corpos de prova com a retirada de uma camada superior e inferior de $\pm 1,5$ mm;
- corpos de prova com a retirada de duas camadas superior e inferior de $\pm 1,5$ mm.

O número de repetições para cada tipo de corpo de prova foi de 2, sendo que, o comprimento do corpo de prova e do vão entre os apoios para teste, foram ajustados de acordo com a espessura final, conforme recomenda a norma ASTM D-1037.

Este método foi adotado com o objetivo de avaliar a influência das diferentes densificações das camadas ao longo da espessura da chapa, sobre os módulos de elasticidade e de ruptura.

c) Ligação interna: para avaliação desta propriedade, adotou-se inicialmente o método proposto por SUCHSLAND⁴⁰, que consiste na correlação entre a tensão de cisalhamento com a

ligação interna. No entanto, observou-se nos testes que a ruptura dos corpos de prova ocorriam nos suportes feitos de compensados e não na porção média das chapas de partículas.

Em virtude desta ocorrência, os testes foram prosseguidos através de tração perpendicular, com as amostras coladas a frio com uma mistura de resina uréia-formol e ácido acético puro, em suportes superior e inferior feitos de compensado de madeira. Foram testados três corpos de prova por chapa.

d) Arrancamento de parafuso: a resistência ao arrancamento de parafuso foi determinado na face e na borda da chapa, em um corpo de prova por chapa. O parafuso utilizado foi o de nº 10 com 1 polegada de comprimento e introduzido no corpo de prova até 2/3 do seu comprimento total.

e) Absorção de água, inchamento em espessura e taxa de não retorno em espessura, foram determinados através do método de imersão em água por 2 e 24 horas. A taxa de não retorno em espessura "springback" ou inchamento residual, foi obtida após a secagem dos corpos de prova nas condições saturadas até a umidade de equilíbrio de $\pm 12\%$, na sala de climatização. Foram utilizados dois corpos de prova por chapa.

3.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Em síntese, o delineamento experimental formulado para cada uma das propriedades estudadas, foram da seguinte forma:

- Flexão estática (MOE, MOR):

Espécie/ Geom.part.		<i>taeda</i>	<i>serotina</i>	<i>glabra</i>	<i>palustris</i>
WAFER	EO	-	-	-	-
	1C	-	-	-	-
	2C	-	-	-	-
FLAKE	EO	-	-	-	-
	1C	-	-	-	-
	2C	-	-	-	-
SLIVER	EO	-	-	-	-
	1C	-	-	-	-
	2C	-	-	-	-

EO: chapas com espessura original; 1C: espessura da chapa após retirada de uma camada; 2C: após retirada de duas camadas.

- Outras propriedades:

Espécie / Geom.part.		<i>taeda</i>	<i>serotina</i>	<i>glabra</i>	<i>palustris</i>
WAFER		-	-	-	-
FLAKE		-	-	-	-
SLIVER		-	-	-	-

Para cada tratamento, considerou-se os valores individuais de cada corpo de prova, para efeito de cálculos para análise estatística.

A análise estatística utilizada foi a análise de covariância para delineamento completamente ao acaso, ao nível de significância do "F" de 95%.

De acordo com WASSERMANN & NETER⁴⁶, a análise de covariância é um método de análise estatística em que se utiliza uma combinação da análise de variância e da regressão

linear. Esta análise pode ser utilizada principalmente para ajustar as médias dos tratamentos das variáveis dependentes (\bar{Y}), em torno de uma média comum da variável independente (\bar{X}) ou covariável.

A utilização da análise de covariância nesta pesquisa, se justifica pela dificuldade de um controle rigoroso da densidade das chapas a nível de laboratório, havendo a necessidade de ajuste dos valores das propriedades em torno de uma densidade média.

A análise de covariância foi feita individualmente para cada sub-grupo, ou seja, para as espécies dentro de cada geometria e para as diferentes geometrias dentro de cada espécie. Para a flexão estática, além dos agrupamentos acima, foi feita a análise para as diferentes camadas para cada espécie e geometria das partículas. As médias das propriedades foram ajustadas em torno de uma média comum da densidade das chapas, dentro de cada agrupamento.

A finalidade deste agrupamento, foi a de verificar os efeitos das diferentes espécies dentro de cada geometria, de diferentes geometrias dentro de cada espécie e de diferentes camadas dentro de cada espécie e geometria de partículas.

Após ter-se verificado diferença significativa nos agrupamentos analisados, procedeu-se ao teste de médias através do método SNK*, ao nível de probabilidade de 95%, para detectar as diferenças significativas entre os tratamentos de cada agrupamento.

Os procedimentos para cálculos e análise foram baseados na metodologia descrita por SOARES³⁶ e GOMES¹¹.

* Student, Newman e Keuls.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 AVALIAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE PROCESSAMENTO

Neste estudo, considerou-se como variáveis de processamento: razão de compactação, dimensões médias das partículas, razões de esbeltez e de planicidade, área superficial específica e disponibilidade de resina por unidade de área das partículas.

Essas variáveis foram geradas devidas às diferentes espécies e geometrias de partículas utilizadas e, determinadas com a finalidade de servirem como base para tentar explicar e justificar as possíveis diferenças nas propriedades das chapas produzidas.

4.1.1 Densidade da Madeira e da Chapa

Os valores médios da densidade da madeira, densidade da chapa e razão de compactação estão apresentados na Tabela 02.

As densidades da madeira das espécies *P. taeda*, *P. glabra* e *P. serotina* apresentaram valores praticamente iguais. A única espécie que apresentou densidade relativamente maior que as demais, foi o *P. palustris*, com $0,54 \text{ g/cm}^3$.

TABELA 02: VALORES MÉDIOS DAS DENSIDADES DA MADEIRA, DA CHAPA E RAZÃO DE COMPACTAÇÃO

Espécie	dm			dc			rc		
	\bar{X}	s^2	n	W	F	S	W	F	S
P. taeda	0,47	0,00617	21	0,794	0,786	0,758	1,69	1,67	1,61
P. glabra	0,48	0,00239	45	0,794	0,760	0,744	1,65	1,58	1,55
P. serotina	0,48	0,00690	42	0,792	0,770	0,764	1,65	1,60	1,59
P. palustris	0,54	0,00406	30	0,798	0,742	0,748	1,48	1,37	1,38

dm: densidade da madeira (g/cm^3);

\bar{X} : média, s^2 : variância, n : nº amostras;

dc: densidade da chapa (g/cm^3);

rc: razão de compactação;

W : chapas do tipo wafer;

F : chapas do tipo flake;

S : chapas do tipo sliver.

Os três tipos de chapas (wafer, flake, sliver) das 4 espécies, foram produzidas para a mesma densidade final de $0,75 \text{ g/cm}^3$, no entanto, devido às dificuldades de um controle rigoroso sobre algumas variáveis do processo de manufatura, constataram-se pequenas diferenças entre as médias das chapas produzidas.

As diferenças nas densidades da madeira de diferentes espécies, aliadas às diferenças nas densidades das chapas, possibilitaram a determinação das razões de compactação, que é a relação entre as densidades da madeira e da chapa.

Os valores médios da Tabela 02, demonstram diferenças nas razões de compactação tanto para espécies como para as chapas produzidas com diferentes geometrias de partículas. A tendência mais marcante foi para o *P. palustris* que apresentou menor valor de razão de compactação que as demais espécies, por ser essa espécie e mais densa. Também entre as chapas de diferentes tipos pode-se constatar diferenças nos valores das razões de compactação, tendo as chapas do tipo "wafer", maiores valores e as chapas do tipo "sliver", menores valores. Essas diferenças são devidas às densidades médias superiores das chapas do tipo "wafer" com relação às dos tipos "flake" e "sliver". A causa provável das diferenças observadas nas densidades entre os diferentes tipos de chapas pode ser atribuída a natureza operacional do processo a nível de laboratório, ser através de manipulação manual e as dimensões das partículas serem diferentes.

4.1.2 Geometria de Partículas

A influência da geometria de partículas sobre as propriedades das chapas é muito pronunciada e relatada por várias fontes bibliográficas pesquisadas.

As diferentes espessura, comprimento e largura das partículas influem sobre as razões de esbeltez e de planicidade, que são as relações entre o comprimento e a espessura, e a largura e espessura das partículas. Também a área superficial específica das partículas e a disponibilidade de resina por unidade de área das partículas sofrem alterações com as diferentes dimensões das partículas.

Os valores médios destas variáveis estão apresentados nas Tabelas 03 e 04.

Pode-se observar que a razão de esbeltez das partículas do tipo "wafer" é bem superior às partículas dos tipos "flake" e "sliver", devido ao seu maior comprimento. As partículas dos tipos "flake" e "sliver" apresentaram as razões de esbeltez praticamente idênticas, devido aos mesmos comprimentos e espessuras nominais das partículas. Com relação à razão de planicidade, não se verificou diferenças consideráveis entre as partículas dos tipos "wafer" e "flake", no entanto as partículas do tipo "sliver" apresentaram valores bem inferiores que dos demais tipos.

Além da sua influência direta sobre a área superficial específica das partículas e na disponibilidade de resina por unidade de área das partículas, como é relatada

TABELA 03: DIMENSÕES MÉDIAS DAS PARTÍCULAS E RELAÇÕES ENTRE
 COMPRIMENTO, LARGURA E ESPESSURA

Geometria	\bar{E}	\bar{L}	\bar{C}	s	f
wafer	0,0659	3,159	3,628	55,05	47,94
flake	0,0569	3,056	1,825	32,07	53,71
sliver	0,0598	0,421	1,823	30,48	7,04

\bar{E} : espessura média (cm);

\bar{L} : largura média (cm);

\bar{C} : comprimento médio (cm);

s : razão de esbeltez (C/E);

f : razão de planicidade (L/E).

TABELA 04: ÁREA SUPERFICIAL ESPECÍFICA DAS PARTÍCULAS E DISPONIBILIDADE DE RESINA POR UNIDADE DE ÁREA

Espécie	AS			DR		
	W	F	S	W	F	S
P. taeda	67,09	78,50	83,58	10,642	9,095	8,543
P. glabra	65,69	76,87	81,84	10,869	9,288	8,724
P. serotina	65,69	76,87	81,84	10,869	9,288	8,724
P. palustris	58,39	68,33	72,75	12,228	10,449	9,814

AS : área superficial específica das partículas (cm^2/g);

DR : disponibilidade de resina por unidade de área (g/cm^2);

W : partículas do tipo wafer;

F : partículas do tipo flake;

S : partículas do tipo sliver.

por MOSLEMI³⁰, com a utilização de partículas mais longas, espera-se melhorar substancialmente a resistência à flexão estática, como tem sido mencionado na literatura (POST³¹, BRUMBAUGH⁵).

Devido principalmente às influências das áreas superficiais das bordas e dos topos das partículas, além das diferentes densidades das espécies, as áreas superficiais específicas foram diferentes entre as espécies e tipos de partículas. As partículas do tipo "sliver" foram as que apresentaram maior área superficial devido às maiores áreas laterais, e as do tipo "wafer", menor área, por possuírem menores áreas laterais. Entre as espécies, o *P. palustris* foi o que apresentou menor área superficial, devido à maior densidade da madeira e conseqüentemente menor número de partículas para um determinado peso.

Por outro lado, a disponibilidade de resina por unidade de área, apresentou resultados inversos a área superficial específica, devido à quantidade de resina aplicada por peso de partículas ser a mesma para todas as espécies e tipos de partículas.

Estas variáveis geradas em função das diferentes espécies e tipos de partículas utilizadas, serão fundamentais para analisar os diferentes comportamentos das chapas em testes mecânicos e não mecânicos.

4.2 PROPRIEDADES DAS CHAPAS

Os resultados das propriedades mecânicas e não mecânicas das chapas, bem como, as sínteses das análises estatísticas dos efeitos de diferentes tratamentos, estão apresen-

tados na forma de tabelas e figuras, nos capítulos seguintes.

De acordo com a norma comercial americana CS 236-66 (Tabela 05), existem os valores mínimos das diversas propriedades das chapas, exigidas para qualificar as chapas de várias densidades e tipos, para sua produção, comercialização e utilização.

Os valores médios obtidos para todas as propriedades avaliadas neste estudo, estão bem acima das médias mínimas exigidas pela norma, o que faz credenciar as chapas aqui produzidas com as espécies de *P. taeda*, *P. serotina*, *P. glabra* e *P. palustris*, com as geometrias de partículas dos tipos "wafer", "flake" e "sliver", para sua comercialização e uso.

4.2.1 Gradiente Vertical de Densidade

Os valores médios das densidades das camadas podem ser visualizadas na Tabela 06 e Figuras 06 e 07.

Analisando à parte as médias dos valores extremos na Tabela 06, as seguintes observações podem ser feitas:

- A 1.^a camada correspondente à superfície inferior apresentou maior densificação que a da superfície superior, em todos os casos. A mesma tendência foi observada também por MATOS²⁹, e a causa provável se deve ao aquecimento inicial ocorrer a partir da superfície inferior, resultando em maior plasticização das partículas, menor resistência a compressão e maior densificação da camada superficial inferior.

- Tanto para a superfície superior como para a inferior, as chapas do tipo "sliver" apresentaram menor densificação que as chapas dos tipos "flake" e "wafer".

TABELA 05: PROPRIEDADES EXIGIDAS PARA CHAPAS DE PARTÍCULAS (NORMA CS 236-66)

TIPO (USO)	DENSIDADE média min.	CLASSE ³ média min.	MÓDULO DE	MÓDULO DE	LIGAÇÃO	EXPANSÃO	ARRANCAMENTO DE	
			(Kg/cm ²) média min.	ELASTICIDADE (Kg/cm ²) média min.	INTERNA (Kg/cm ²) média min.	(%) média max.	FACE (média min.)	PARAFUSO BORD. (média min.)
1 ¹	A (alta densidade, 0,80 g/cm ³ e acima)	1	168	24500	14	0,55	204,12	-----
		2	236	24500	9,8	0,55	----	----
	B (média densidade, entre 0,60 e 0,80 g/cm ³)	1	112	24500	4,9	0,35	102,06	72,38
		2	168	28000	4,2	0,30	102,06	90,72
	C (alta densidade, 0,60 g/cm ³ e abai- xo)	1	56	10500	1,4	0,30	56,70	----
		2	98	17500	2,1	0,30	79,38	----
2 ²	A (alta densidade, 0,80 g/cm ³ e acima)	1	168	24500	8,75	0,55	204,12	----
		2	238	35000	28,0	0,55	226,80	158,76
	B (média densidade, entre 0,60 e 0,80 g/cm ³)	1	126	17500	4,55	0,35	102,06	72,58
		2	175	31500	4,2	0,25	113,40	90,72

¹ Tipo 1 - Chapa de partícula (geralmente feita com resina uréia-formaldeído) adequada para aplicações interiores.

² Tipo 2 - Chapa de partícula feita com resina durável e altamente resistente à umidade e calor (geralmente resina fenólica) adequada para aplicações interiores e certas aplicações exteriores quando assim classificadas.

³ Classe - classificações de resistência baseadas nas propriedades dos painéis correntemente produzidos.

TABELA 06: GRADIENTE VERTICAL DE DENSIDADE - MÉDIA DOS VALORES EXTREMOS
E DAS CHAPAS

Geometria/ Espécie	wafer					flake					sliver				
	DC	SS	SI	Mx	Mn	DC	SS	SI	Mx	Mn	DC	SS	SI	Mx	Mn
P. taeda	0,82	0,77	0,93	0,98	0,73	0,84	0,77	0,94	1,00	0,75	0,81	0,65	0,70	0,98	0,63
P. serotina	0,81	0,76	1,05	1,05	0,74	0,83	0,74	0,86	0,95	0,74	0,78	0,69	0,75	0,96	0,66
P. palustris	0,85	0,82	0,81	0,97	0,77	0,84	0,79	0,90	0,99	0,77	0,81	0,61	0,78	0,97	0,61
P. glabra	0,82	0,82	0,85	1,00	0,75	0,85	0,76	0,90	0,97	0,76	0,82	0,60	0,77	0,98	0,64

DC : densidade média da chapa;

SS : 1^a camada superior;

SI : 1^a camada inferior;

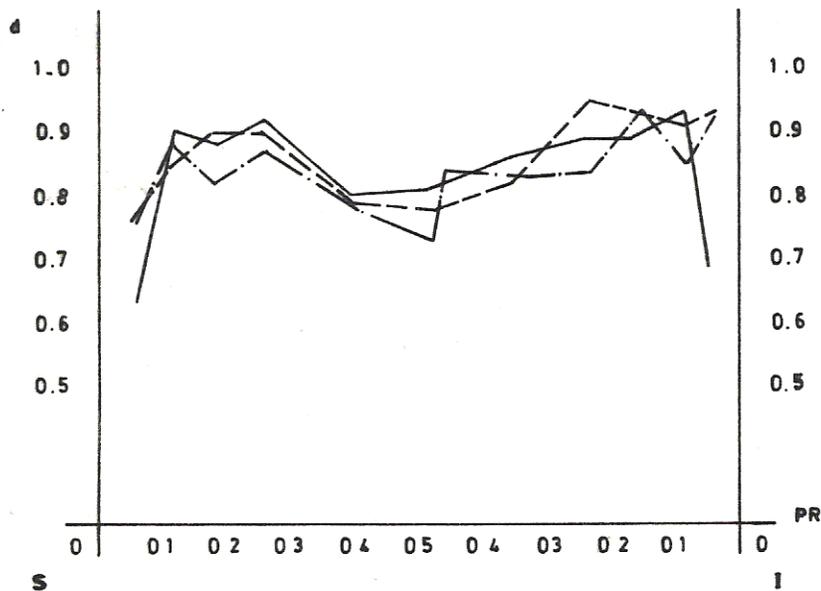
Mx : camada de densificação máxima;

Mn : camada de densificação mínima.

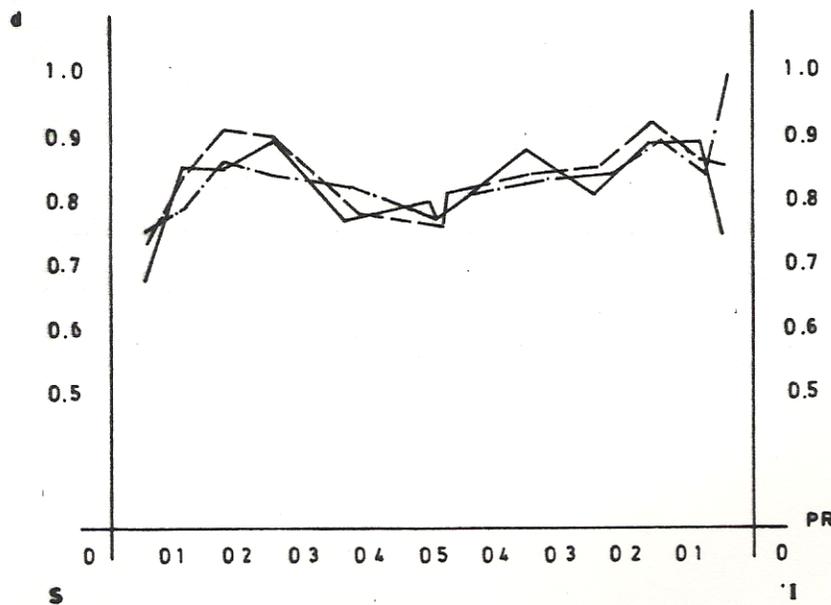
Unidade : g/cm³

FIGURA 06 : EFEITO DA GEOMETRIA DE PARTÍCULAS SOBRE O GRADIENTE VERTICAL DE DENSIDADE (MÉDIA DAS CAMADAS)

a- P. taeda:



b- P. serotina:



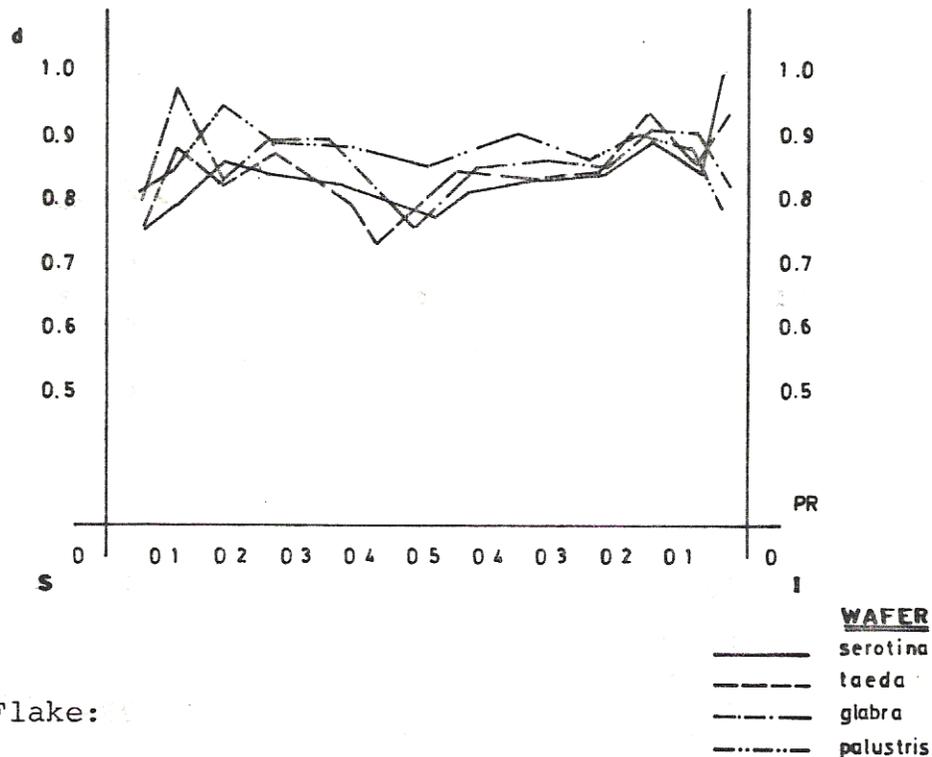
d: densidade (g/cm³)
 PR: posição relativa
 S: superior
 I: inferior

taeda
 — SLIVER
 - - - FLAKE
 - · - · - WAFER

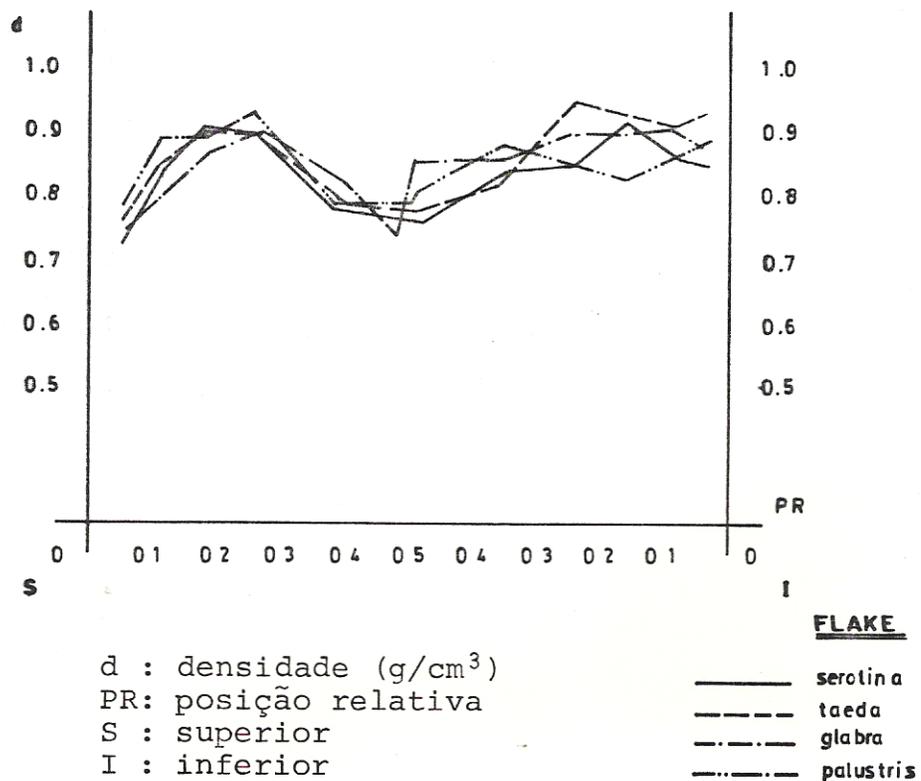
serotina
 — SLIVER
 - - - FLAKE
 - · - · - WAFER

FIGURA 07: EFEITO DAS ESPÉCIES SOBRE O GRADIENTE VERTICAL DE DENSIDADE (MÉDIA DAS CAMADAS)

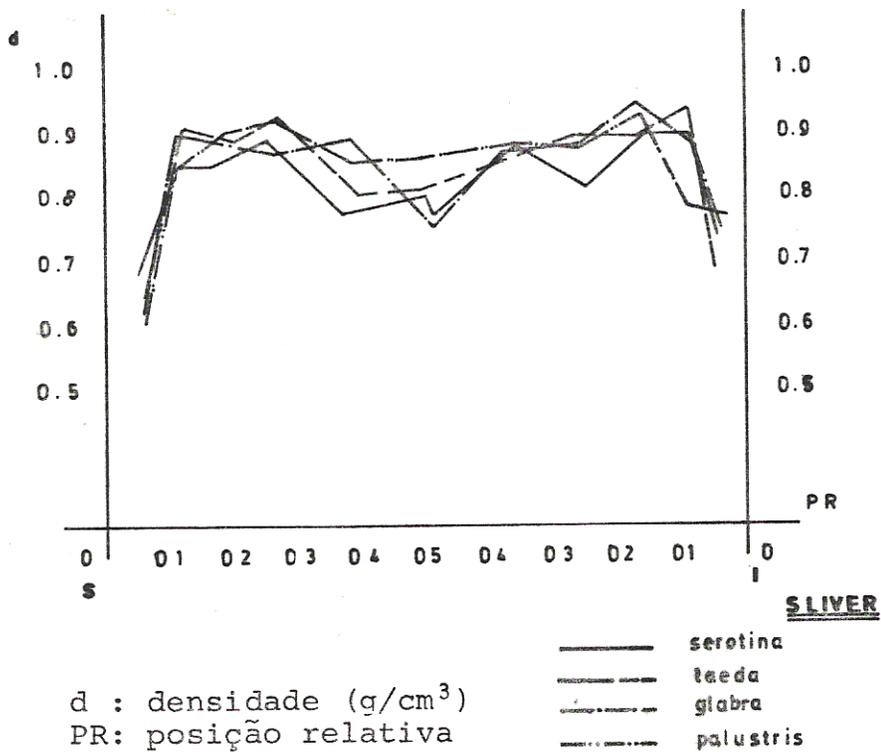
a- Wafer:



b- Flake:



c- Sliver:



- As diferenças entre as camadas de densificações máxima e mínima foram mais acentuadas para as chapas do tipo "sliver" que para chapas de demais tipos. Isto se deve à menor densidade das camadas de densificação mínima das chapas do tipo "sliver", uma vez que, as camadas de máxima densificação são aproximadamente iguais para os três tipos de chapas.

- As densidades médias das chapas estão entre as densidades das camadas de máxima e mínima densificações. A densidade da 1.^a camada superior foi menor que a densidade média das chapas em todos os tipos de chapas. A superfície inferior apresentou maior densificação que a densidade média das chapas, para os tipos "flake" e "wafer", ocorrendo o inverso para as chapas do tipo "sliver".

O efeito da geometria de partículas sobre o gradiente vertical de densidade para cada espécie (Figura 06, itens a, b, c, d), demonstraram que a densidade da superfície superior é menor que as primeiras camadas mais internas, em todos os casos observados, e menor que o miolo na maioria dos casos. Para a superfície inferior, as chapas do tipo "wafer" do *P. taeda* e *P. serotina*, e do tipo "flake" do *P. taeda*, apresentaram maior densificação que a camada imediatamente interna. A superfície inferior das chapas dos tipos "wafer" e "flake" apresentaram maior densificação que o miolo.

A menor densificação tanto da superfície superior como da inferior das chapas do tipo "sliver" com relação às dos tipos "flake" e "wafer", foram observadas para todas as espécies. Fato este, que pode ser atribuído ao maior tempo

de fechamento da prensa requerido pelas chapas do tipo "sliver", contribuindo para sua menor densificação superficial. Resultados similares foram obtidos por MATOS²⁹, onde as chapas produzidas com o tempo de fechamento de 100 segundos, apresentaram menor densificação superficial que as chapas produzidas com o tempo de 35 segundos.

Observou-se também que a influência de diferentes geometrias de partículas sobre a densificação da porção média da chapa varia para cada espécie, não podendo se precipitar conclusões claras a esse respeito.

Através da Figura 07, itens a, b, c, pode se constatar que o efeito das espécies sobre a formação do gradiente vertical de densidade para os três tipos de chapas, não foram tão pronunciadas. Portanto, pode-se afirmar que neste caso, a razão de compactação não foi uma variável de evidência sobre o gradiente vertical de densidade. Para melhor avaliação sobre a sua influência, possivelmente as diferenças nas densidades entre as espécies terão que ser mais pronunciadas, permitindo maiores diferenças nas razões de compactação e conseqüentemente no tempo de fechamento da prensa.

A única evidência clara é com relação ao perfil do gradiente vertical da densidade das chapas do tipo "sliver", que demonstrou para todas as espécies, uma tendência para o formato em "M", ou seja, as duas superfícies (superior e inferior) e o miolo com menor densificação que as camadas intermediárias. Essa tendência foi observada apenas na metade superior das chapas do tipo "wafer" e "flake", devido à maior densificação das superfícies inferiores na maioria dos casos.

De acordo com SMITH³⁴, com maior tempo de fechamento da prensa, o perfil do gradiente vertical de densidade toma forma de "M". HEEBINK *et alii*¹⁴, obtiveram perfil em formato de "U", com o tempo de fechamento de 15 segundos, passando para formato de "M" com maior tempo de fechamento. Neste estudo, o tempo de fechamento médio foi de 45 segundos para chapas dos tipos "wafer" e "flake" e de 50 segundos para as do tipo "sliver".

4.2.2 Módulo de Elasticidade (MOE)

Uma análise ampla sobre os efeitos das diversas variáveis de processamento sobre o módulo de elasticidade, foi proposta neste estudo. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 07 e Figuras 08, 09 e 10.

Analisando os valores médios das densidades dos corpos de prova dos três tipos de chapas para três diferentes espessuras (Tabela 07), pode-se constatar que para chapas do tipo "wafer", a densidade média dos corpos de prova na espessura original foi praticamente igual ao valor médio obtido após retirada de uma camada superficial. Fato este, que pode ser atribuída a maior densificação média das camadas superficiais dessas chapas com relação às dos tipos "flake" e "sliver". A alta densificação da superfície inferior das chapas de *P. serotina* e *P. taeda*, também exerceram grande influência sobre os resultados observados.

Mesmo com as densidades médias praticamente iguais entre os corpos de prova na espessura original e após a remoção de uma camada, os valores do MOE destes foram bem superiores que daqueles. Possivelmente, com a retirada de uma

TABELA 07 : VALORES MÉDIOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE (MOE)

Espécie/ Geometria			taeda	serotina	palustris	glabra
WAFER	EO	\overline{MOE}	55.966	52.967	50.720	53.796
		\overline{d}	0,803	0,803	0,803	0,803
		\overline{MOEa}	55.505	51.584	51.181	55.179
	1C	\overline{MOE}	79.939	89.728	78.644	77.081
		\overline{d}	0,796	0,796	0,796	0,796
		\overline{MOEa}	81.811	91.599	72.032	79.950
	2C	\overline{MOE}	52.431	55.364	59.132	52.852
		\overline{d}	0,760	0,760	0,760	0,760
		\overline{MOEa}	52.994	54.665	58.884	53.235
FLAKE	EO	\overline{MOE}	49.505	48.840	47.713	50.949
		\overline{d}	0,788	0,788	0,788	0,788
		\overline{MOEa}	47.597	49.668	50.558	49.185
	1C	\overline{MOE}	83.656	77.121	73.891	65.040
		\overline{d}	0,833	0,833	0,833	0,833
		\overline{MOEa}	83.939	74.003	78.521	63.245
	2C	\overline{MOE}	52.259	45.168	44.407	45.491
		\overline{d}	0,724	0,724	0,724	0,724
		\overline{MOEa}	50.405	44.308	47.617	44.994
SLIVER	EO	\overline{MOE}	38.383	42.108	38.558	38.006
		\overline{d}	0,744	0,744	0,744	0,744
		\overline{MOEa}	39.142	42.068	37.638	38.206
	1C	\overline{MOE}	68.240	66.207	66.703	67.383
		\overline{d}	0,810	0,810	0,810	0,810
		\overline{MOEa}	68.106	67.866	66.209	66.351
	2C	\overline{MOE}	51.155	54.189	46.165	40.393
		\overline{d}	0,747	0,747	0,747	0,747
		\overline{MOEa}	51.757	53.737	45.111	41.296

Legenda:

\overline{MOE} (kg/cm²) : módulo de elasticidade (média dos valores originais);

\overline{d} (g/cm³) : densidade média;

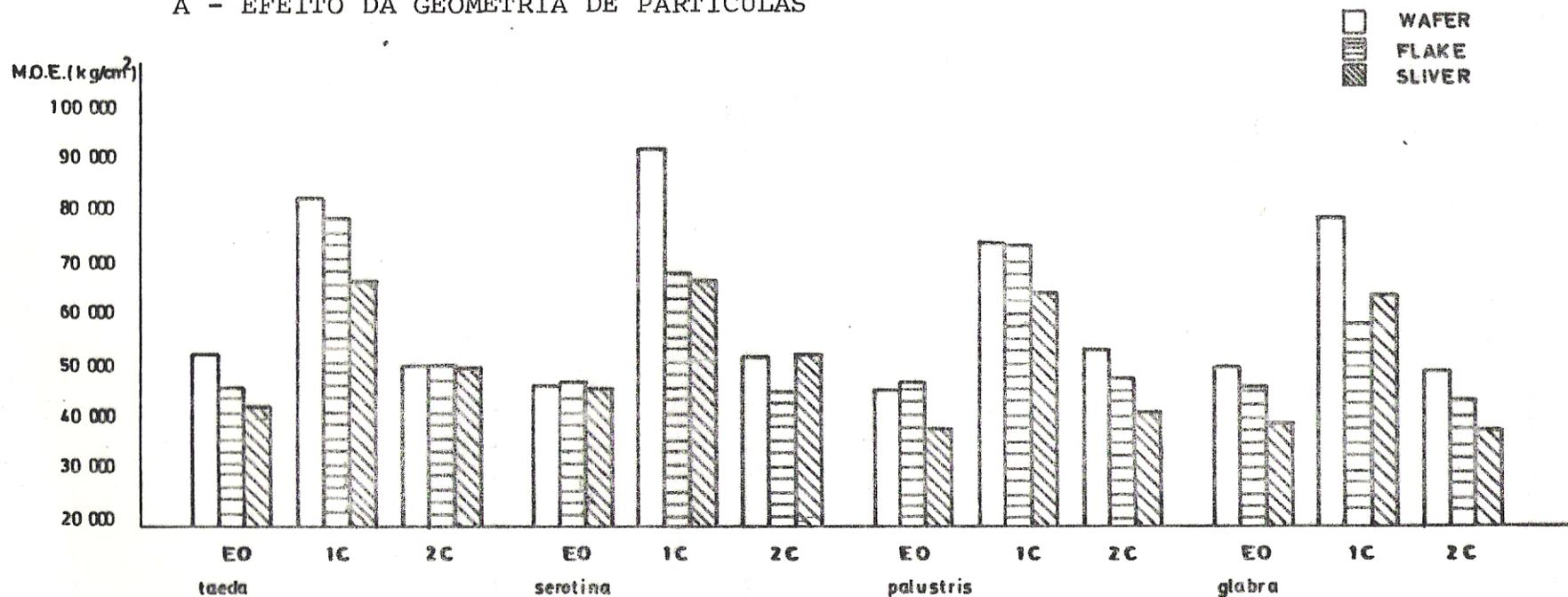
\overline{MOEa} (kg/cm²) : módulo de elasticidade (médias ajustadas);

EO : chapas com espessura original;

1C : chapas após remoção de 1 camada;

2C : chapas após remoções de 2 camadas.

FIGURA 08 : MÓDULO DE ELASTICIDADE (MOE) - MÉDIAS AJUSTADAS
 A - EFEITO DA GEOMETRIA DE PARTÍCULAS

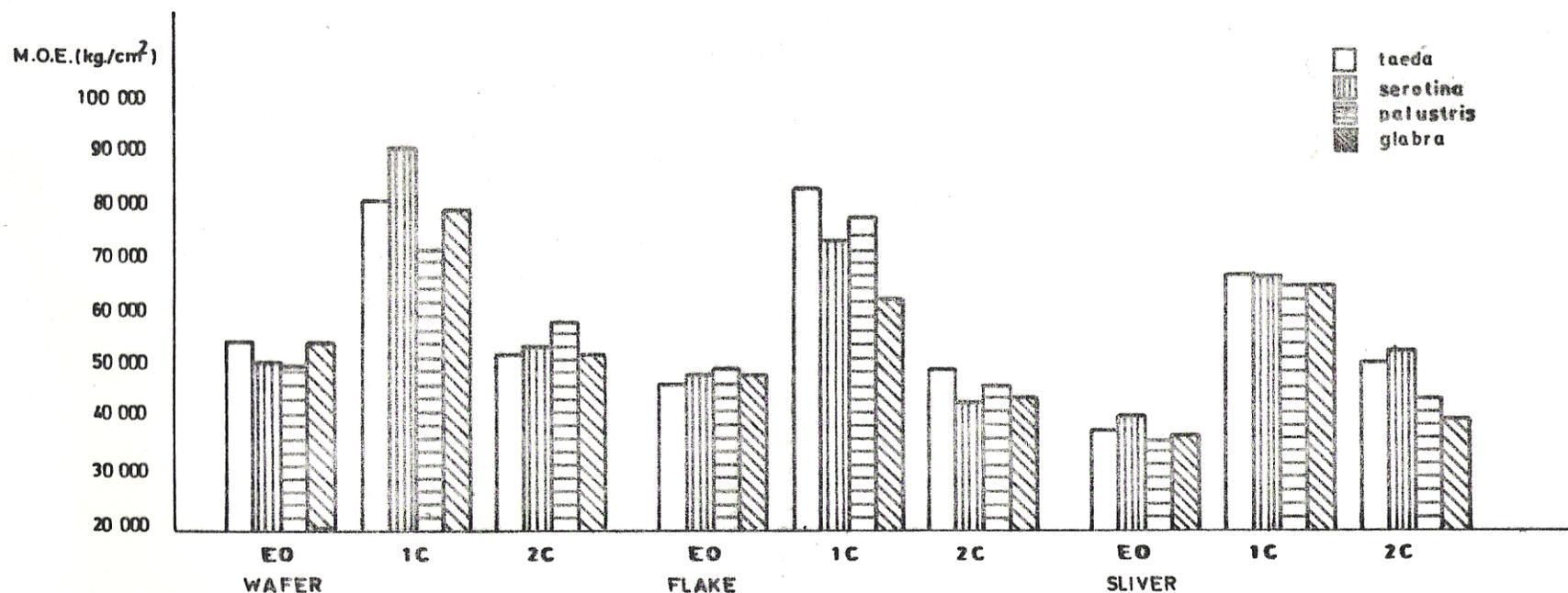


Síntese da análise estatística:

	taeda	serotina	palustris	glabra
EO:	W > F, S	ns	F > S	W > S; F > S
1C:	W > S; F > S	W > F, S	ns	W > F, S
2C:	ns	W > F; S > F	W > S, F > S	W > S

Legenda: EO: etapas com espessura original; 1C: chapas após remoção de 1 camada;
 2C: chapas após remoções de 2 camadas.

FIGURA 09: MÓDULO DE ELASTICIDADE (MOE) - MÉDIAS AJUSTADAS
B - EFEITO DAS ESPÉCIES

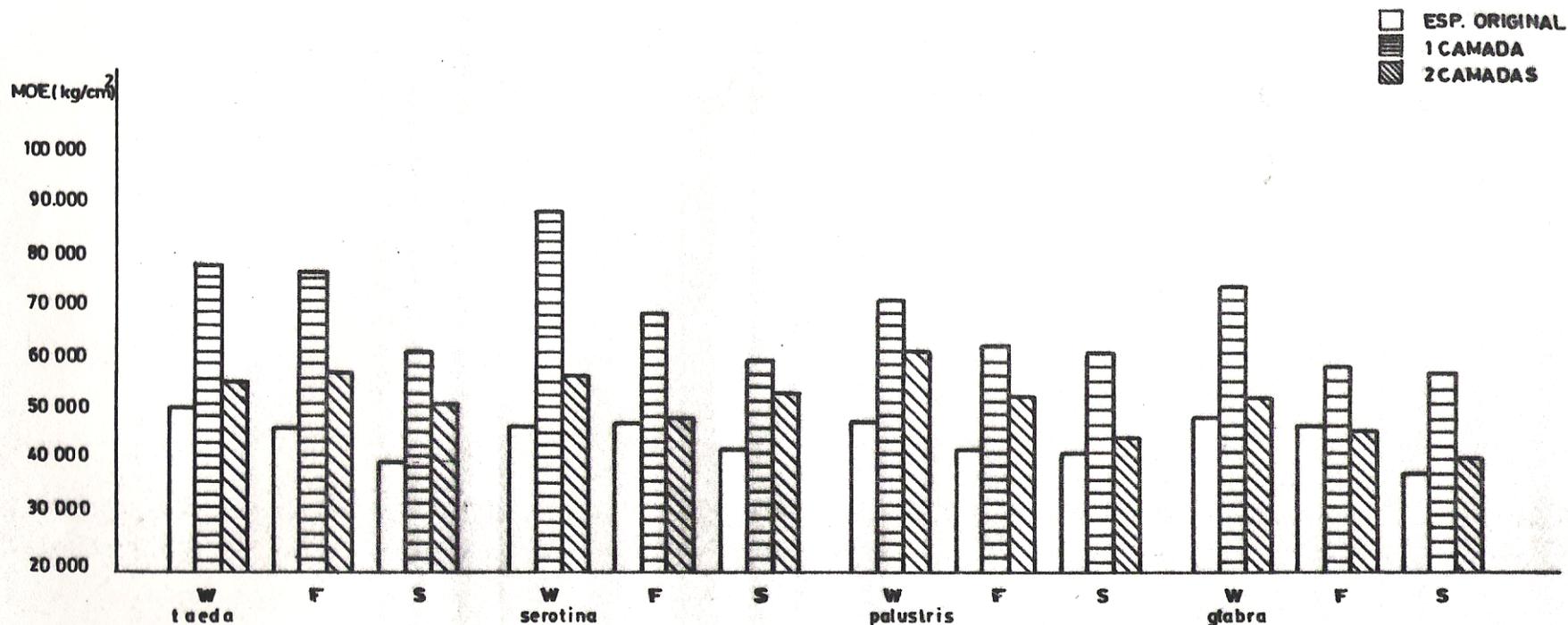


Síntese da análise estatística:

	wafer	flake	sliver
EO:	ns	ns	ns
1C:	Se > P	T > G; P > G	ns
2C:	ns	ns	T > G, P; Se > G, P

Legenda: EO: chapas com espessura original; 1C: chapas após remoção de 1 camada; 2C: chapas após remoções de 2 camadas
T: taeda; Se: serotina; P: palustris; G: glabra.

FIGURA 10 : MÓDULO DE ELASTICIDADE (MOE)-MÉDIAS AJUSTADAS
C - EFEITO DO GRADIENTE VERTICAL DE DENSIDADE



Síntese da análise estatística:

	taeda	serotina	palustris	glabra
Wafer:	1C > EO, 2C	1C > EO, 2C	1C > EO, 2C 2C > EO	1C > EO, 2C
Flake:	1C > EO, 2C 2C > EO	1C > EO, 2C	1C > EO, 2C 2C > EO	1C > EO, 2C
Sliver:	1C > EO, 2C 2C > EO	1C > EO, 2C 2C > EO	1C > EO, 2C	1C > EO, 2C

Legenda: EO: chapas com espessura original; 1C: chapas após remoção de 1 camada; 2C: chapas após remoções de 2 camadas.

camada superficial, houve a exposição de camada mais densificada aos esforços em flexão estática.

Para chapas dos tipos "flake" e "sliver", pode-se observar que com as retiradas de uma e duas camadas superficiais, resultaram respectivamente em aumento e redução da densidade média dos corpos de prova e também dos valores do MOE.

O efeito da geometria de partículas sobre o MOE, foi analisado dentro de cada espécie e para três diferentes espessuras das chapas, após retiradas de camadas equivalentes (Figura 08).

Para chapas com espessura original, as do tipo "wafer" foram superiores às do tipo "sliver" para as espécies *P. taeda* e *P. glabra*, e superior às do tipo "flake" para o *P. taeda*. Para o *P. palustris*, as chapas do tipo "flake" apresentaram maior MOE que as do tipo "sliver" e para o *P. serotina* não se constatou diferenças significativas entre as três geometrias de partículas.

Após a retirada de uma camada (superior e inferior), as chapas do tipo "wafer" foram superiores às do tipo "sliver" nas espécies *P. taeda*, *P. serotina* e *P. glabra*, e superior às do tipo "flake" nas espécies *P. serotina* e *P. glabra*. As chapas do tipo "flake" foram superiores às do tipo "sliver" apenas para o *P. taeda*, e no *P. palustris*, não se constatou nenhuma diferença significativa entre as três geometrias.

Com a retirada de duas camadas, não se constatou diferenças significativas entre as três geometrias nas chapas do *P. taeda*. Nestas condições, as chapas do tipo "wafer"

foram estatisticamente superiores que as do tipo "sliver" para o *P. palustris* e *P. glabra*, e superior às do tipo "flake" no *P. serotina*. Para o *P. palustris*, as chapas do tipo "flake" foram superiores às do tipo "sliver", enquanto que para o *P. serotina* ocorreu a situação inversa.

As variações evidenciadas nos resultados entre os diferentes tratamentos e condições de testes, podem ser atribuídas às possíveis influências dos diferentes perfis do gradiente vertical de densidade, que se pronunciaram após as remoções das sucessivas camadas das chapas.

O que se pode constatar é a maior rigidez (MOE) das chapas do tipo "wafer" sobre os demais tipos de chapas, na grande maioria dos casos.

Passando à análise dos efeitos das diversas variáveis de processamento em estudo, Tabelas 03 e 04, pode se observar que as partículas do tipo "wafer" possuem maior razão de esbeltez que demais tipos de partículas, contribuindo para maior MOE. Fato este, que vem a confirmar os resultados obtidos por KEINERT Jr.¹⁸ e outros autores.

Entre as chapas do tipo "flake" e "sliver", pode se constatar uma tendência dos efeitos produzidos pela razão de planicidade, uma vez que, a maior rigidez das chapas do tipo "flake", foi constatada na maioria dos casos em que houveram diferenças significativas entre os dois tipos de chapas. KEINERT Jr.¹⁸, também constatou essa diferença após reduzir a largura das partículas do tipo "wafer" no moinho de martelo, produzindo as partículas do tipo "sliver".

Outra variável que possivelmente tenha contribuído para as diferenças constatadas entre os três tipos de chapas,

é a área superficial específica das partículas e a disponibilidade de resina por unidade de área. As partículas do tipo "wafer", por apresentarem menor área superficial específica, tiveram maior disponibilidade de resina por unidade de área, ocorrendo a relação inversa para as chapas do tipo "sliver".

Com relação ao efeito das diferentes espécies sobre o MOE, poucas diferenças significativas foram constatadas. No entanto, nos resultados obtidos por BRITO⁴, para três espécies do gênero *Pinus*, as diferenças entre as espécies também foi muito pouco evidenciada.

Para as chapas após retirada de uma camada superficial (superior e inferior), o *P. serotina* foi estatisticamente superior que o *P. palustris* nas chapas do tipo "wafer", e o *P. taeda* e *P. palustris* foram superiores que o *P. glabra* nas chapas do tipo "flake". Para as chapas do tipo "sliver" não houve diferença significativa entre as espécies.

Após a remoção de duas camadas superficiais, não se detectou diferenças significativas entre as espécies, para as chapas dos tipos "wafer" e "flake". Para as chapas do tipo "sliver", o *P. taeda* e o *P. serotina* foram superiores que o *P. glabra* e o *P. palustris*.

Considerando-se apenas as chapas com espessura original, pode se concluir que para estas espécies e nas condições formuladas neste estudo as principais variáveis de processamento relacionadas às espécies, que seriam a razão de compactação, área superficial específica das partículas e a disponibilidade de resina por unidade de área, não influenciaram os valores do MOE.

Esses resultados contrariam as conclusões apresentadas por vários autores, entre eles (VITAL *et alii*⁴⁴, HSE *et alii*¹⁵), que relatam a existência de uma relação direta entre a razão de compactação e o MOE. No entanto, KEINERT Jr.¹⁸, afirma no seu trabalho que o efeito das diferentes espécies sobre o MOE para chapas de mesma densidade, apresentado por KLAUDITZ & STEGMAN nem sempre é verdadeira. Neste estudo, as diferenças na densidade entre as espécies *P. taeda*, *P. serotina* e *P. glabra*, praticamente inexistiram. No entanto, para o *P. palustris* que apresentou densidade relativamente maior que as demais espécies, era de se esperar menores valores de MOE, devido a menor razão de compactação. Possivelmente, as diferenças em densidades da madeira e razão de compactação das chapas entre as espécies, foram pequenas a ponto de não influírem para diferenciação em termos estatísticos. Sobre o ponto de vista tecnológico e econômico, cabe ressaltar que os resultados obtidos são satisfatórios pelas seguintes razões: primeiro, pela possibilidade de mistura dessas espécies para produção de chapas e segundo, por ser o *P. palustris* espécie mais densa, menor volume de material seria requerido para produção de chapas de mesma densidade, sem prejuízo qualitativo.

As diferenças observadas após as retiradas das camadas, provavelmente se deve às diferentes densificações das camadas mais internas das chapas, manifestadas de forma não uniformes para diferentes espécies e geometrias de partículas.

A redução na espessura das chapas após retiradas sucessivas de camadas superficiais (superior e inferior), per-

mite avaliar a influência dos perfis do gradiente vertical de densidade sobre o MOE, para diferentes espécies e geometria de partículas.

Através da Figura 10, pode se observar que para todos os tipos de chapas das 4 espécies em estudo, a remoção de uma camada superficial resultaram em maiores valores de MOE que as chapas com a espessura original e com a retirada de duas camadas. Mesmo as chapas com a retirada de duas camadas apresentaram valores de MOE estatisticamente superiores que as de espessura original, para muitos dos casos observados. Chapas com a espessura original não apresentaram resultados superiores que as demais em nenhum dos casos observados.

Analisando os perfis do gradiente vertical de densidade, pode-se constatar que com a remoção de uma camada superficial, está se retirando as camadas menos densificadas das superfícies das chapas e expondo as camadas mais densificadas aos esforços de tração (inferior) e de compressão (superior) nos testes de flexão estática, resultando em maiores valores de MOE.

Com a remoção de duas camadas superficiais, tende-se a aproximar do miolo da chapa, onde ocorre a redução gradativa da densidade das camadas neste sentido, reduzindo o seu MOE. Entretanto, mesmo nessas posições intermediárias, a densificação das camadas é superior às faces das chapas, podendo-se evidenciar maiores valores de MOE após a remoção de duas camadas, que as chapas com espessura original, em todos os casos em que houveram diferenças significativas.

Portanto, fica comprovada a influência do gradiente vertical de densidade sobre o MOE, inclusive das camadas mais internas e não apenas da densidade da camada superficial, como normalmente mencionados na literatura (KELLY²¹, STRICKLER³⁸, HEEBINK *et alii*¹⁴).

4.2.3 Módulo de Ruptura (MOR)

Os efeitos dos tratamentos sobre o módulo de ruptura podem ser observados na Tabela 08 e Figuras 11, 12 e 13.

A análise dos valores médios de MOR e densidade média dos corpos de prova apresentados na Tabela 08, permite visualizar clara diferenciação entre os valores obtidos para os três tipos de chapas e três diferentes espessuras de corpos de prova.

As diferenças observadas para o MOR são similares às do MOE, como afirma KELLY²¹, de que as diversas variáveis de processamento influencia^M de forma similar tanto o MOE como o MOR; e VITAL *et alii*⁴⁴, que obtiveram alta correlação entre estas duas propriedades. Portanto, as análises feitas para o MOE no capítulo anterior, cabem aqui serem consideradas.

As influências exercidas pela geometria de partículas sobre o módulo de ruptura estão apresentadas na Figura 11, onde se constata para chapas de espessura original, valores estatisticamente superiores das chapas do tipo "wafer" sobre as do tipo "flake", com exceção para o *P. palustris*. As chapas do tipo "wafer" foram superiores às do tipo "sliver" apenas na espécie *P. glabra*. Não foram observadas diferenças significativas entre as chapas dos tipos "flake" e "sliver".

TABELA 08. VALORES MÉDIOS DE MÓDULO DE RUPTURA (MOR)

Espécie/ Geometria			taeda	serotina	palustris	glabra
WAFER	EO	\overline{MOR}	401,95	458,20	410,66	417,26
		\overline{d}	0,803	0,803	0,803	0,803
		\overline{MORa}	398,06	446,53	414,54	428,92
	1C	\overline{MOR}	445,74	435,96	480,67	478,10
		\overline{d}	0,796	0,796	0,796	0,796
		\overline{MORa}	452,72	442,94	456,01	488,80
	2C	\overline{MOR}	368,70	367,55	449,56	366,87
		\overline{d}	0,760	0,760	0,760	0,760
		\overline{MORa}	377,45	356,70	445,71	372,82
FLAKE	EO	\overline{MOR}	342,66	347,32	378,16	359,23
		\overline{d}	0,788	0,788	0,788	0,788
		\overline{MORa}	326,18	354,47	402,71	344,00
	1C	\overline{MOR}	421,30	477,03	444,09	418,50
		\overline{d}	0,833	0,833	0,833	0,833
		\overline{MORa}	423,04	457,83	472,61	407,44
	2C	\overline{MOR}	351,69	349,58	292,54	359,84
		\overline{d}	0,728	0,728	0,728	0,728
		\overline{MORa}	344,78	343,06	307,44	358,38
SLIVER	EO	\overline{MOR}	310,52	348,22	320,61	304,82
		\overline{d}	0,744	0,744	0,744	0,744
		\overline{MORa}	317,99	347,83	311,57	306,78
	1C	\overline{MOR}	403,20	424,61	410,43	409,49
		\overline{d}	0,812	0,812	0,812	0,812
		\overline{MORa}	403,91	434,75	403,59	405,48
	2C	\overline{MOR}	350,34	395,12	314,44	319,05
		\overline{d}	0,747	0,747	0,747	0,747
		\overline{MORa}	354,54	391,97	307,10	325,34

Legenda:

\overline{MOR} (kg/cm²) : módulo de ruptura (média dos valores originais);

\overline{d} (g/cm³) : densidade média;

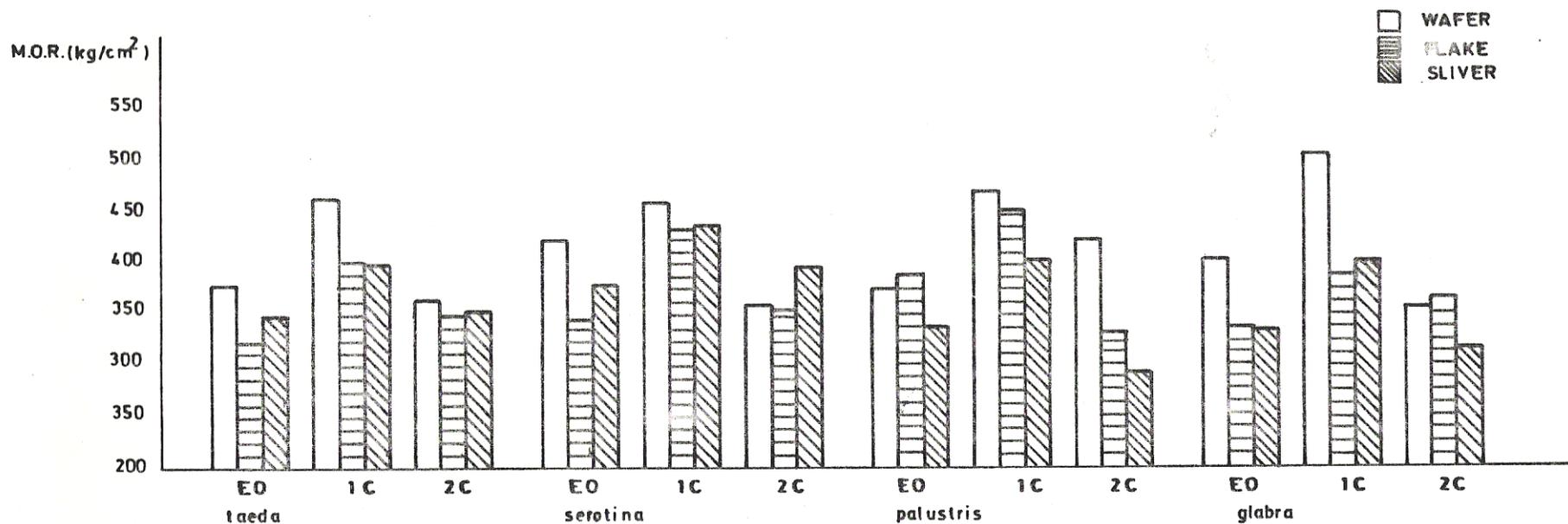
\overline{MORa} (kg/cm²) : módulo de ruptura (médias ajustadas);

EO : chapas com espessura original;

1C : chapas após remoção de 1 camada;

2C : chapas após remoções de 2 camadas.

FIGURA 11 : MÓDULO DE RUPTURA (MOR) - MÉDIAS AJUSTADAS
 A - EFEITO DA GEOMETRIA DE PARTÍCULAS

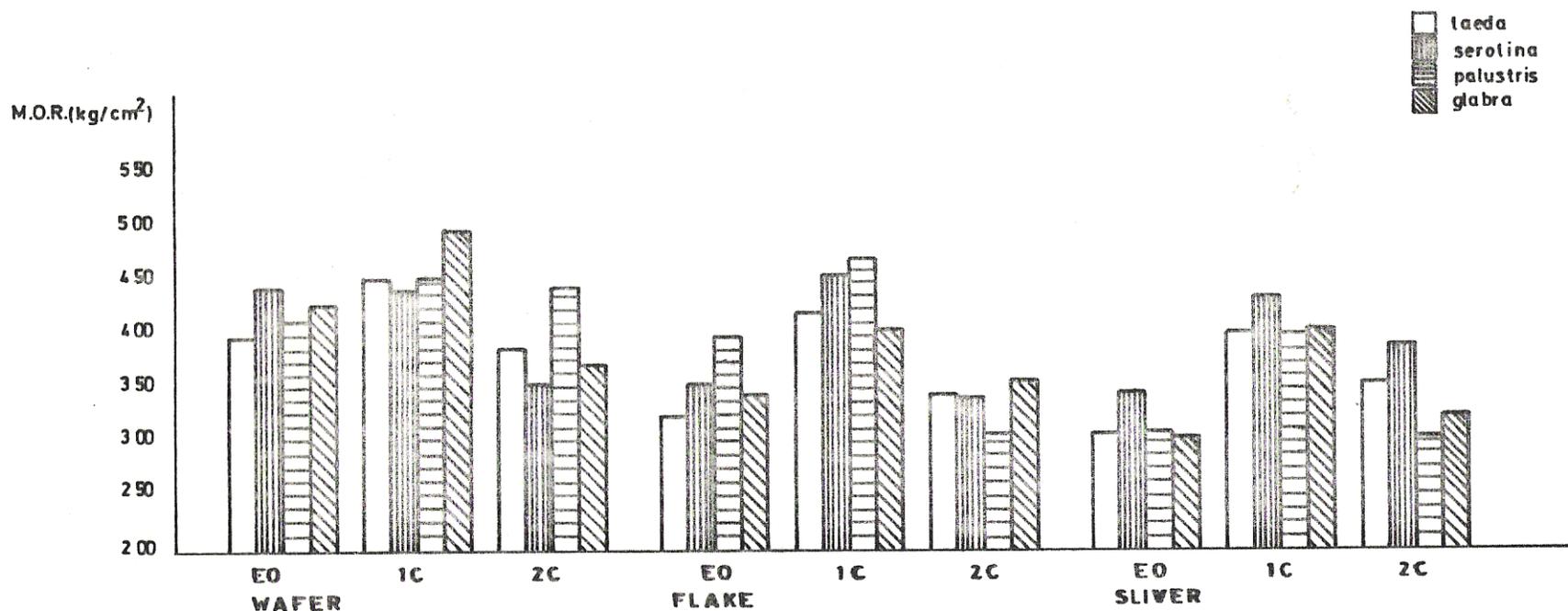


Síntese da análise estatística:

	taeda	serotina	palustris	glabra
EO:	W > F	W > F	ns	W > F, S
1C:	W > F, S	ns	ns	W > F, S
2C:	ns	ns	W > F, S	ns

Legenda: EO: chapas com espessura original; 1C: etapas após remoção de 1 camada;
 2C: chapas após remoções de 2 camadas.

FIGURA 12: MÓDULO DE RUPTURA (MOR) - MÉDIAS AJUSTADAS
B - EFEITO DAS ESPÉCIES

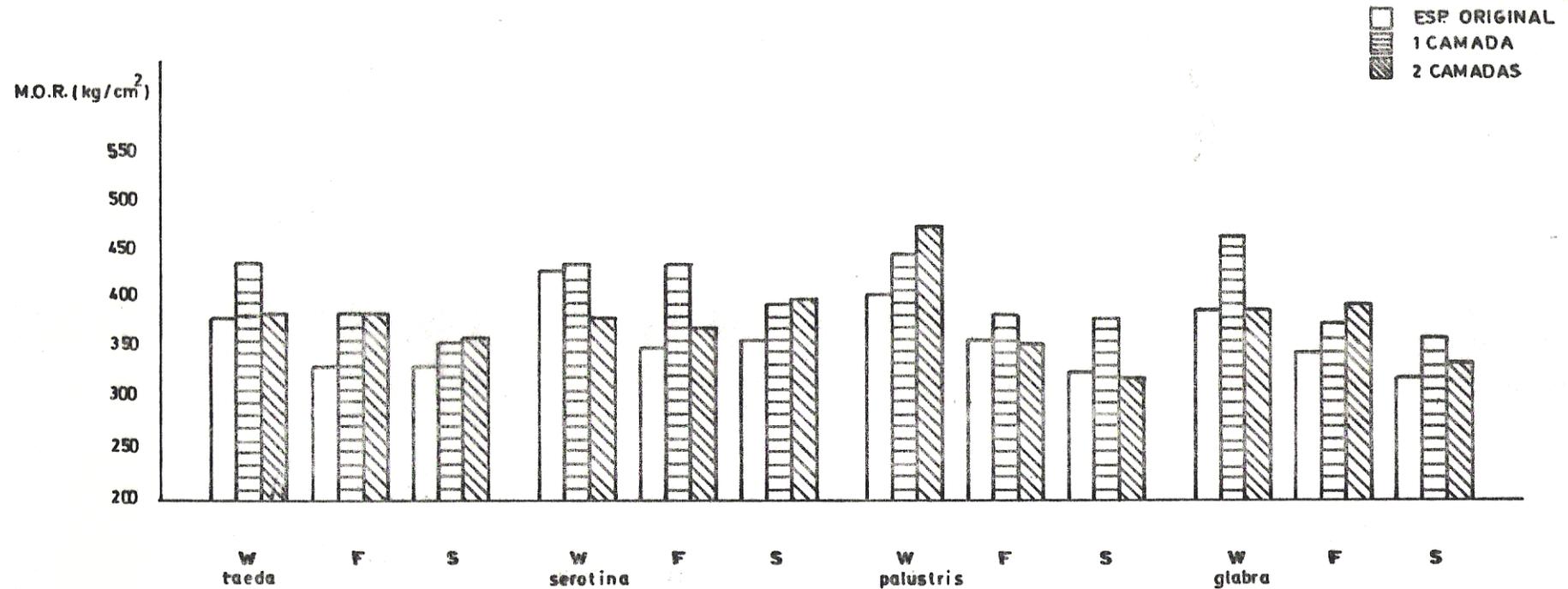


Síntese da análise estatística:

	wafer	flake	sliver
EO:	ns	P > T, Se, G	Se > G, P
1C:	ns	ns	ns
2C:	P > T, Se, G	ns	Se > T, P, G; T > P

Legenda: EO: chapas com espessura original; 1C: etapas após remoção de 1 camada; 2C: chapas com remoções de 2 camadas
T: taeda; Se: serotina; P: palustris; G: glabra.

FIGURA 13: MÓDULO DE RUPTURA (MOR) - MÉDIAS AJUSTADAS
C - EFEITO DO GRADIENTE VERTICAL DE DENSIDADE



Síntese da análise estatística:

	taeda	serotina	palustris	glabra
Wafer:	1C >EO, 2C	ns	ns	1C >EO, 2C
Flake:	1C >EO	1C >EO, 2C	ns	ns
Sliver:	1C >EO; 2C >EO	1C >EO; 2C >EO		

Legenda: EO: chapas com espessura original; 1C: chapas após remoção de 1 camada;
2C: chapas após remoções de 2 camadas.

Com base nas tendências observadas, pode se afirmar que, a razão de esbeltez e possivelmente a disponibilidade de resina por unidade de área, foram as variáveis que definiram a superioridade das chapas do tipo "wafer" sobre as chapas dos tipos "flake" e "sliver".

Com as remoções de uma e duas camadas superficiais, o efeito da geometria de partículas foi constatado apenas em alguns casos. No entanto, os valores do MOR das chapas do tipo "wafer" foram estatisticamente superiores que as dos tipos "flake" e "sliver". Portanto, pode-se afirmar que mesmo com a presença do efeito do gradiente vertical de densidade, a influência do comprimento das partículas e da razão de esbeltez foi evidenciada.

Ao contrário das relações constatadas para o MOE, a razão de planicidade não influenciou nos resultados do MOR, uma vez que, não foram verificadas diferenças significativas entre as chapas dos tipos "flake" e "sliver" em todos os casos observados.

A análise global dos resultados permite concluir que as variáveis responsáveis pelas diferenças observadas foram o comprimento das partículas e a razão de esbeltez, pelas seguintes razões: a superioridade das chapas do tipo "wafer" com relação às de outros tipos de chapas, poderia ter a influência também de maior disponibilidade de resina por unidade de área das partículas, por apresentarem menor área superficial específica. No entanto, o fato de que as chapas dos tipos "flake" e "sliver" não apresentarem diferenças significativas, descarta esta possibilidade, por serem estas chapas produzidas com partículas de mesmo comprimento mas

Com base nas tendências observadas, pode se afirmar que, a razão de esbeltez e possivelmente a disponibilidade de resina por unidade de área, foram as variáveis que definiram a superioridade das chapas do tipo "wafer" sobre as chapas dos tipos "flake" e "sliver".

Com as remoções de uma e duas camadas superficiais, o efeito da geometria de partículas foi constatado apenas em alguns casos. No entanto, os valores do MOR das chapas do tipo "wafer" foram estatisticamente superiores que as dos tipos "flake" e "sliver". Portanto, pode-se afirmar que mesmo com a presença do efeito do gradiente vertical de densidade, a influência do comprimento das partículas e da razão de esbeltez foi evidenciada.

Ao contrário das relações constatadas para o MOE, a razão de planicidade não influenciou nos resultados do MOR, uma vez que, não foram verificadas diferenças significativas entre as chapas dos tipos "flake" e "sliver" em todos os casos observados.

A análise global dos resultados permite concluir que as variáveis responsáveis pelas diferenças observadas foram o comprimento das partículas e a razão de esbeltez, pelas seguintes razões: a superioridade das chapas do tipo "wafer" com relação às de outros tipos de chapas, poderia ter a influência também de maior disponibilidade de resina por unidade de área das partículas, por apresentarem menor área superficial específica. No entanto, o fato de que as chapas dos tipos "flake" e "sliver" não apresentarem diferenças significativas, descarta esta possibilidade, por serem estas chapas produzidas com partículas de mesmo comprimento mas

larguras diferentes, portanto, diferentes áreas superficiais específicas e disponibilidade de resina por unidade de área.

A existência de uma relação direta entre o MOR e as variáveis comprimento das partículas e razão de esbeltez é relatada por BRUMBAUGH⁵, LEHMANN²⁶ e POST³¹.

O efeito das espécies sobre o módulo de ruptura (Figura 12), para chapas com espessura original foi mais pronunciado que nos resultados obtidos para o módulo de elasticidade.

Para chapas do tipo "flake", o *P. palustris* apresentou maiores valores de MOR que as chapas produzidas com outras espécies. Por outro lado, nas chapas do tipo "sliver", o *P. serotina* foi estatisticamente superior que o *P. glabra* e o *P. palustris*. Não houve diferenças significativas entre as espécies, para chapas do tipo "wafer".

Após a retirada de uma camada superficial, os resultados do MOR entre as espécies não apresentaram diferenças significativas para os três tipos de chapas.

Com a remoção de duas camadas superficiais, o *P. palustris* foi estatisticamente superior que as demais espécies nas chapas do tipo "wafer". Para chapas do tipo "sliver", o *P. serotina* apresentou maior MOR que as chapas de demais espécies e o *P. taeda* foi superior ao *P. palustris*. Nas chapas do tipo "flake", não se constataram diferenças significativas entre as espécies.

É interessante salientar que, especificamente para chapas do tipo "flake" com espessura original, o *P. palustris* apresentou MOR superior que as demais espécies, quando o resultado esperado seria o inverso, devido a sua menor razão

de compactação, como relatam VITAL *et alii*⁴⁴ e HSE *et alii*¹⁵. No entanto, devido a maior densidade do *P. palustris* a sua área superficial específica foi menor e conseqüentemente a disponibilidade de resina por unidade de área foi maior, o que faz demonstrar que, neste caso, estas variáveis foram determinantes para justificar os resultados obtidos.

Para chapas do tipo "sliver", não se pode constatar com clareza os efeitos das variáveis em estudo, mesmo porque, embora o *P. palustris* tenha menor MOR que o *P. serotina*, o *P. glabra* que apresentou as mesmas condições numéricas das variáveis do *P. serotina*, teve menor MOR.

A análise dos efeitos do gradiente vertical de densidade sobre o módulo de ruptura dos três tipos de chapas de diferentes espécies (Figura 13), demonstrou que a variação na densificação das camadas, observada após retiradas das camadas superficiais não foram tão pronunciadas como no caso de módulo de elasticidade.

No entanto, para casos em que houveram diferenças significativas entre as chapas de diferentes espessuras, observou-se que a remoção de uma camada superficial resulta em maior MOR que das chapas de espessura original e com a retirada de duas camadas, principalmente com relação a primeira.

Em todos os casos observados, as chapas com espessura original apresentaram menor MOR que as chapas após as retiradas de uma e duas camadas superficiais.

Portanto, pode se comprovar mais uma vez, as influências exercidas pelas diferentes densificações das camadas ao longo da espessura da chapa, sobre o módulo de ruptura

e principalmente da maior densificação das camadas imediatamente mais internas.

4.2.4 Ligação Interna (LI)

A ligação interna é a propriedade que mede o grau de adesão entre as partículas no interior da chapa.

De acordo com a literatura, inúmeras variáveis influem sobre a ligação interna, entre as quais, as mais mencionadas são a espessura das partículas e as variáveis inerentes ao ciclo da prensa, que por sua vez, exercem grandes efeitos sobre a formação do gradiente vertical de densidade.

Neste estudo, o efeito da geometria de partículas sobre a ligação interna pode ser bem evidenciado na Tabela 09 e Figura 14.

Para todas as espécies estudadas pode se observar maiores valores de LI para as chapas do tipo "sliver", sendo que, para o *P. taeda*, *P. serotina* e *P. palustris*, as diferenças foram significativas ao nível de 95% de probabilidade. Entre as chapas dos tipos "wafer" e "flake", apenas as de *P. serotina* apresentaram diferenças significativas, com as chapas do tipo "wafer" sendo superiores às do tipo "flake".

Analisando os perfis do gradiente vertical de densidade das espécies separadamente, pode-se constatar valores de densidade levemente superiores na porção central das chapas do tipo "sliver" das espécies em questão, com exceção do *P. glabra*, o que pode ter contribuído nas diferenças observadas, contrariando os resultados obtidos por STRICKLER³⁸. O maior entreleçamento das partículas "sliver", por serem

TABELA 09. VALORES MÉDIOS DE LIGAÇÃO INTERNA (LI)

Espécie	taeda			serotina			palustris			glabra		
	W	F	S	W	F	S	W	F	S	W	F	S
Geometria												
LI (kg/cm ²)	8,83	10,78	14,55	12,95	12,33	14,75	12,45	12,69	16,18	10,47	11,25	13,19
Densidade média (g/cm ³)		0,802			0,805			0,789			0,774	
LI (kg/cm ²) médias ajust.	8,90	11,17	14,09	13,37	11,79	14,87	12,34	12,66	16,32	10,63	11,08	13,20

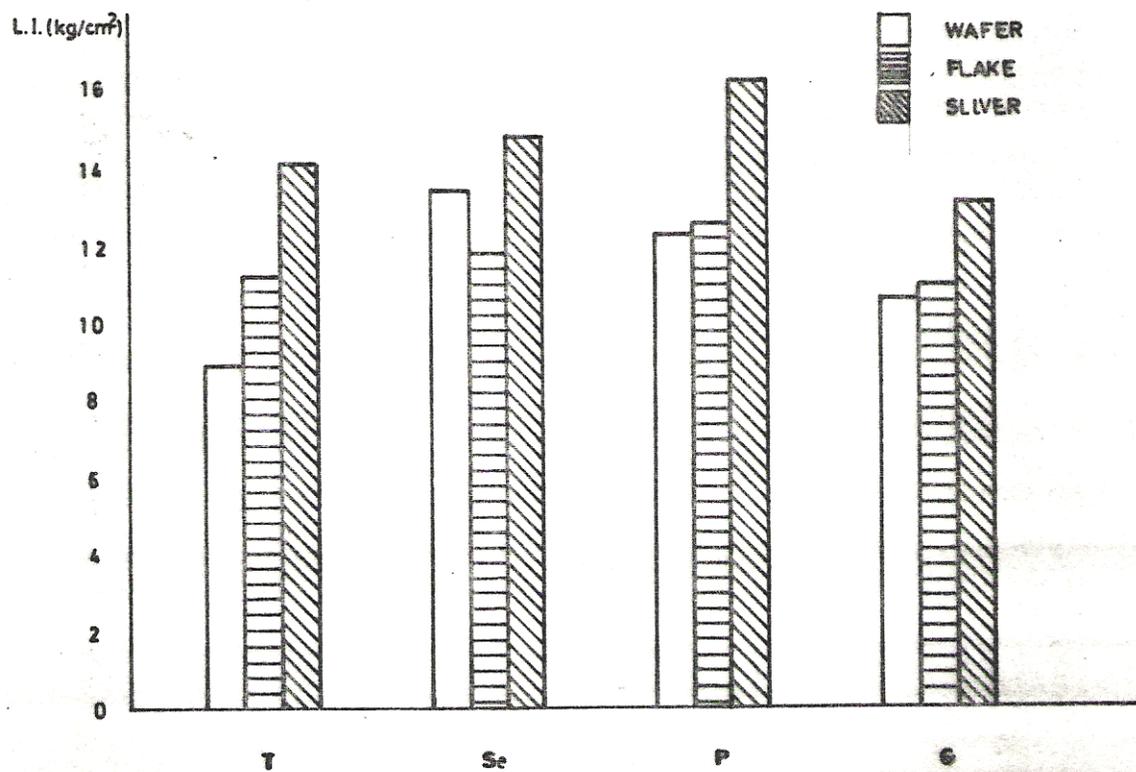
Legenda:

W : chapas do tipo "wafer";

F : chapas do tipo "flake";

S : chapas do tipo "sliver".

FIGURA 14 : LIGAÇÃO INTERNA (LI)-MÉDIAS AJUSTADAS
A - EFEITO DA GEOMETRIA DE PARTÍCULAS



Síntese da análise estatística:

taeda	serotina	palustris	glabra
S > W, F	S > F W > F	S > W, F	ns

Legenda: T: taeda; Se: serotina; P: palustris; G: glabra
W: wafer; F: flake; S: sliver

menores e em maior quantidade, pode ter contribuído também para maior ligação interna.

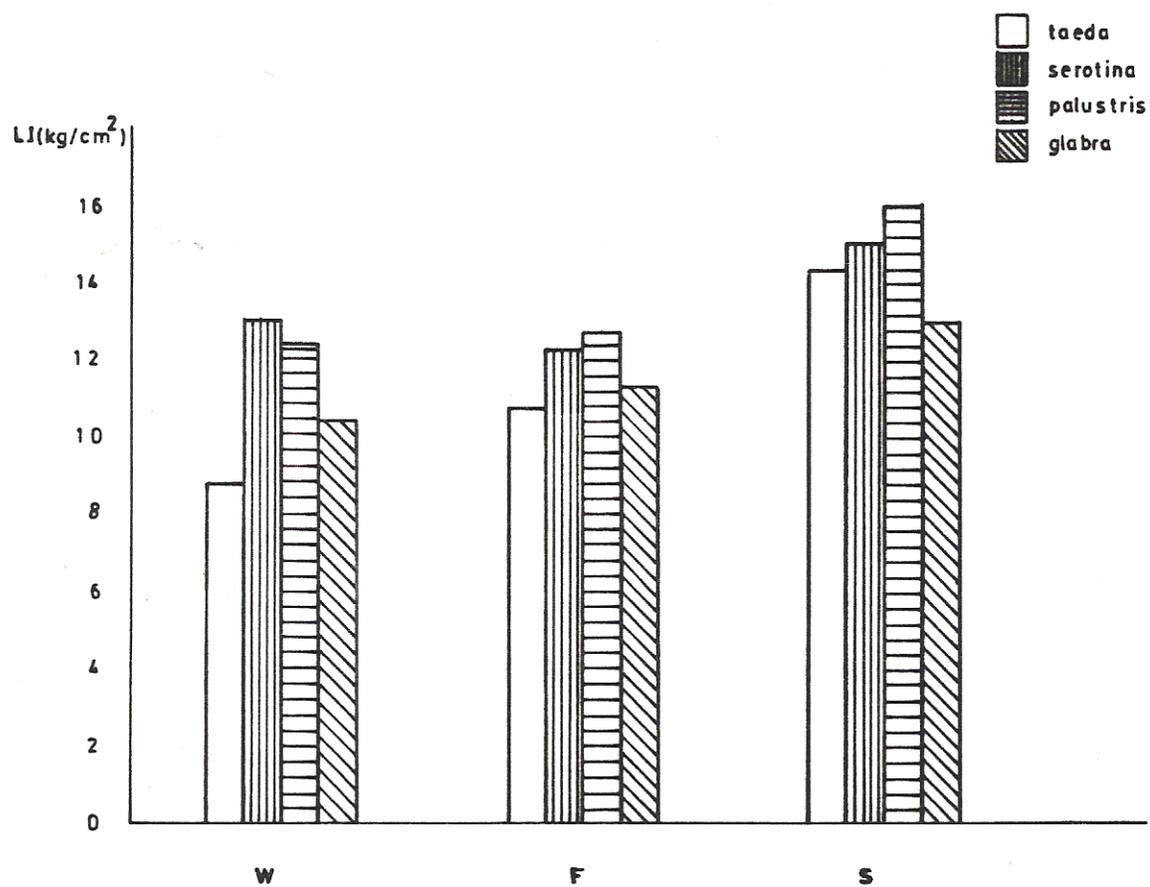
De acordo com a Tabela 04, onde a área superficial específica das partículas do tipo "sliver" é maior que as do tipo "flake" e este do "wafer", resultando em relações inversas em termos de disponibilidade de resina por unidade de área, pode-se concluir que para as partículas de mesma espessura, a disponibilidade de resina por unidade de área não influenciou sobre os valores de ligação interna obtidos neste estudo.

Por outro lado, os resultados obtidos apresentaram cerca concordância com as afirmações feitas por STEWART & LEHMANN³⁷, TALBOTT & MALONEY⁴³ e vários outros, de que a utilização de partículas menores no miolo da chapa de três camadas, melhora substancialmente a ligação interna. KEINERT Jr. & MATOS¹⁹, obtiveram também maiores valores de LI para chapas produzidas com partículas menores em comprimento e largura. A maior área superficial específica das partículas menores, embora com menor disponibilidade de resina por unidade de área, com relação às partículas maiores, possa talvez influenciar em termos de melhor distribuição de esforços de tração, resultando em melhor ligação interna.

Com relação ao efeito das espécies sobre a ligação interna, Tabela 09 e Figura 15, na maioria dos casos os resultados vêm a confirmar as observações feitas por VITAL *et alii*⁴⁴, da relação inversa entre a razão de compactação e ligação interna.

Para as chapas do tipo "wafer", a LI do *P. palustris* e do *P. serotina* foram superiores às do

FIGURA 15 : LIGAÇÃO INTERNA (LI)-MÉDIAS AJUSTADAS
B - EFEITO DAS ESPÉCIES



Síntese da análise estatística:

wafer	flake	sliver
Se > T, G	ns	P > G
P > T, G		

Legenda: T: taeda; Se: serotina; P: palustris; G: Glabra.
W: wafer; F: flake; S: sliver.

P. taeda e *P. glabra*. De acordo com a Tabela 02, as chapas produzidas com o *P. palustris* foram as que apresentaram menor razão de compactação.

VITAL *et alii*⁴⁴, atribuem como possível causa desta relação, aos menores danos causados às partículas em virtude da menor razão de compactação.

Neste caso, a maior disponibilidade de resina por unidade de área das partículas do *P. palustris*, também possa ter influenciado para melhor ligação interna.

Analisando os perfis do gradiente vertical de densidade, pode se constatar que tanto para as chapas do tipo "wafer" como do tipo "sliver", a densidade da porção média das chapas do *P. palustris*, apresentaram valores maiores que as densidades das demais espécies, contribuindo para valores superiores de ligação interna.

Portanto, pode-se afirmar que neste estudo, as variáveis que influenciaram mais efetivamente nos valores finais da ligação interna foram a densidade da porção média das chapas e a razão de compactação das chapas produzidas com diferentes espécies.

4.2.5 Arrancamento de Parafuso (RAP)

. RAPf - Face:

Os resultados obtidos para a resistência ao arrancamento de parafuso no sentido da espessura das chapas (RAPf), estão apresentados na Tabela 10 e Figuras 16 e 17.

Com relação aos efeitos das três diferentes geometrias de partículas, a única diferença significativa observada foi para as chapas produzidas com *P. serotina*. A análise

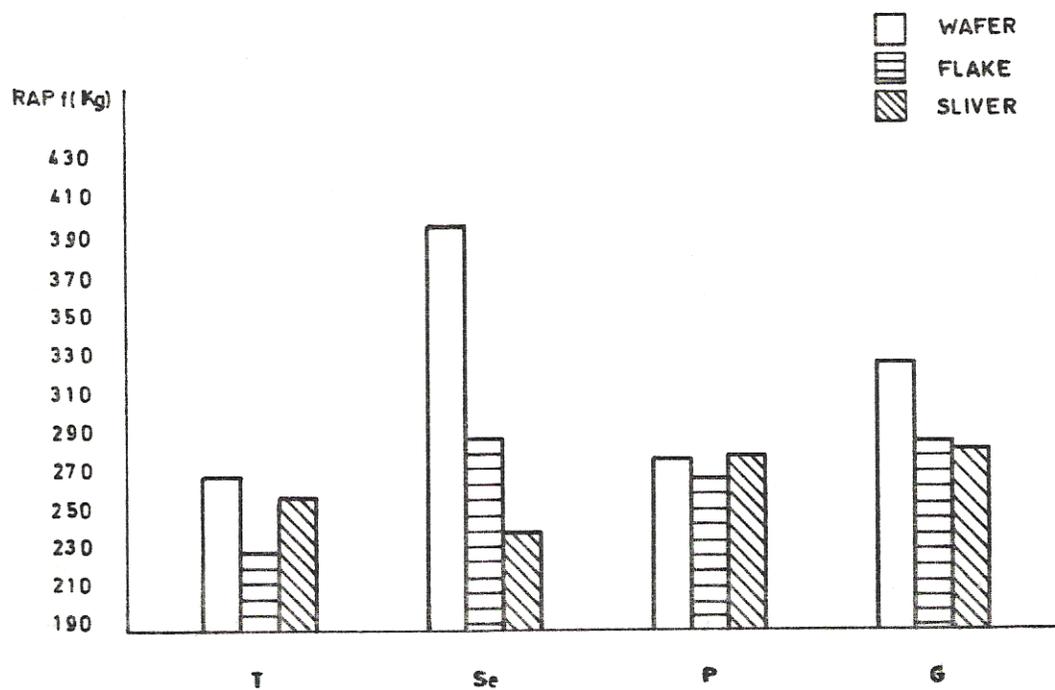
TABELA 10. VALORES MÉDIOS DE RESISTÊNCIA AO ARRANCAMENTO DE PARAFUSO (RAPf-FACE)

Espécie	taeda			serotina			palustris			glabra		
	W	F	S	W	F	S	W	F	S	W	F	S
RAPf (kg)	276,5	240,0	250,2	406,7	291,0	240,4	298,5	259,5	285,0	340,7	285,2	281,5
Densidade média (g/cm ³)		0,782			0,779			0,774			0,782	
RAPf (kg) médias ajust.	270,2	233,7	262,7	403,1	289,1	245,9	282,2	274,5	286,3	333,6	288,5	285,4

Legenda:

- W : chapas do tipo "wafer";
- F : chapas do tipo "flake";
- S : chapas do tipo "sliver".

FIGURA 16 : RESISTÊNCIA AO ARRANCAMENTO DE PARAFUSO (RAPf) -
 -MÉDIAS AJUSTADAS
 A - EFEITO DA GEOMETRIA DE PARTÍCULAS



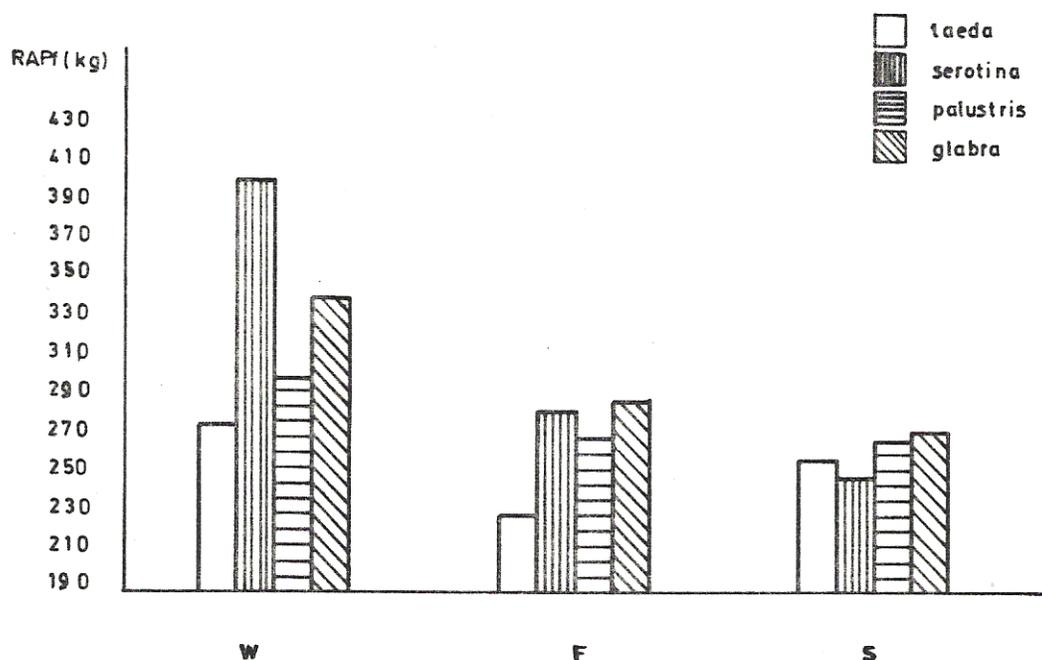
Síntese da análise estatística:

taeda	serotina	palustris	glabra
ns	W > F, S	ns	ns

Legenda: T: taeda; Se: serotina; P: palustris; G: glabra.

W: wafer; F: flake; S: sliver.

FIGURA 17: RESISTÊNCIA AO ARRANCAMENTO DE PARAFUSO (RAPf) -
 -MÉDIAS AJUSTADAS
 B - EFEITO DAS ESPÉCIES



Síntese da análise estatística:

wafer	flake	sliver
Se > P, T	ns	ns

Legenda: T: taeda; Se: serotina; P: palustris; G: glabra.
 W: wafer; F: flake; S: sliver.

estatística demonstrou que as chapas do tipo "wafer" apresenta RAPf superior às chapas dos tipos "flake" e "sliver". Nas demais espécies, os efeitos das geometrias de partículas não foram evidenciadas.

A influência das diferentes espécies sobre a RAPF foi observada apenas nas chapas do tipo "wafer", onde a resistência das chapas de *P. serotina* foi superior que as chapas produzidas com *P. palustris* e *P. taeda*.

Analisando-se os efeitos das variáveis de processamento em estudo, pode-se concluir que a razão de compactação não influenciou na RAPf, uma vez que, as chapas de *P. taeda* são as que possuem maior razão de compactação e apresentaram resultados inferiores. Também, a disponibilidade de resina por unidade de área das partículas, não influenciou nos resultados finais de resistência. No estudo realizado por BRITO⁴, para três espécies do gênero *Pinus*, não se constatou também diferenças significativas na RAPf.

A única evidência que pode ser considerada, é com relação ao perfil do gradiente vertical de densidade, onde as chapas do tipo "wafer" do *P. serotina* apresentou maior densificação na superfície inferior, com relação às dos tipos "flake" e "sliver". O mesmo aconteceu entre as espécies, para as chapas do tipo "wafer", nas quais, o *P. serotina* apresentou maior densificação da superfície inferior que as chapas de outras espécies. MATOS²⁹, obteve também maior RAPf para chapas com maior densificação superficial. É provável que o ponto de maior densificação pode estar em qualquer das posições relativas ao longo da espessura da chapa, para exercer influência sobre a RAPf.

De acordo com a Tabela 05, pode-se observar ainda que, tanto para as chapas do tipo "flake" como para as do tipo "sliver", os valores de densificação máxima para as quatro espécies foram praticamente iguais, comprovando os resultados não significativos obtidos para estes tratamentos. As mesmas observações podem ser feitas para diferentes tipos de chapas dentro de cada espécie.

Portanto, pode-se concluir que o perfil do gradiente vertical de densidade exerce uma influência marcante sobre a resistência ao arrancamento de parafuso na face.

RAPb - Borda

A resistência ao arrancamento de parafuso no sentido paralelo à superfície da chapa, não apresentou diferenças significativas devido aos efeitos das diferentes geometrias de partículas (Tabela 11 e Figura 18).

O efeito das diferentes espécies foi observado apenas nas chapas do tipo "flake", onde o *P. palustris* apresentou valores estatisticamente superiores que as chapas de demais espécies (Tabela 11 e Figura 19).

Neste caso, os resultados obtidos não permitiram tirar conclusões claras acerca dos efeitos das variáveis de processamento em estudo.

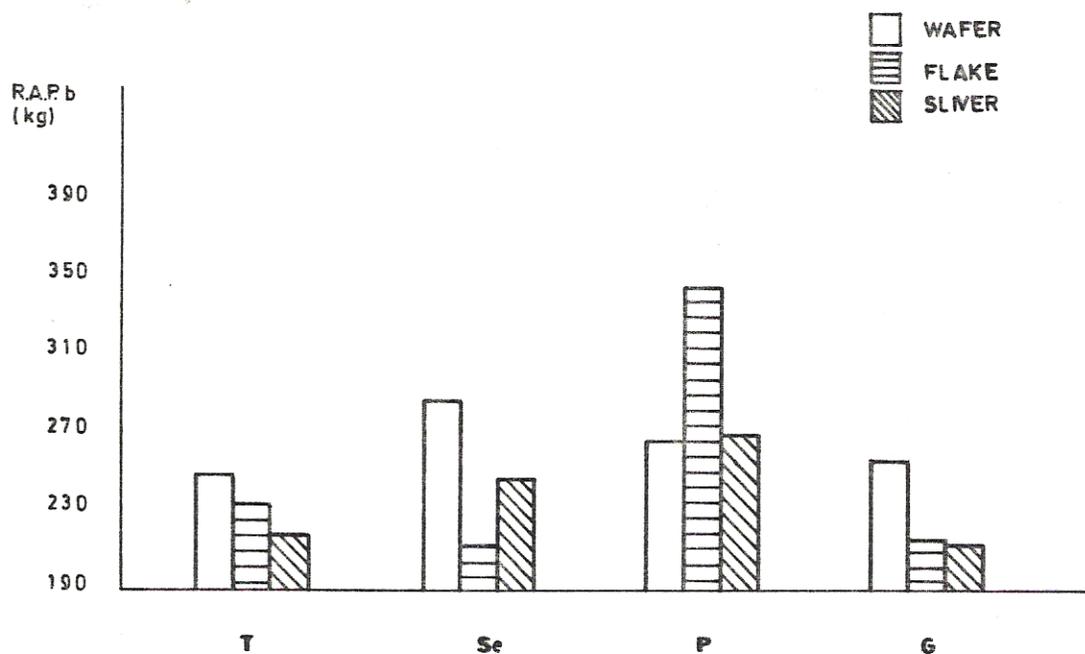
TABELA 11. VALORES MÉDIOS DE RESISTÊNCIA AO ARRANCAMENTO DE PARAFUSO (RAPb-BORDA)

Espécie	taeda			serotina			palustris			glabra		
	W	F	S	W	F	S	W	F	S	W	F	S
RAPb (kg)	249,2	232,2	225,5	290,7	216,0	252,2	260,0	355,0	275,7	265,7	225,7	210,5
Densidade média (g/cm ³)		0,762			0,744			0,729			0,747	
RAPb (kg) médias ajust.	249,0	237,0	221,0	292,2	216,6	250,1	269,3	348,1	273,4	259,7	223,2	219,1

Legenda:

- W : chapas do tipo "wafer";
- F : chapas do tipo "flake";
- S : chapas do tipo "sliver".

FIGURA 18 : RESISTÊNCIA AO ARRANCAMENTO DE PARAFUSO (RAPb) -
 -MÉDIAS AJUSTADAS
 A - EFEITO DA GEOMETRIA DE PARTÍCULAS

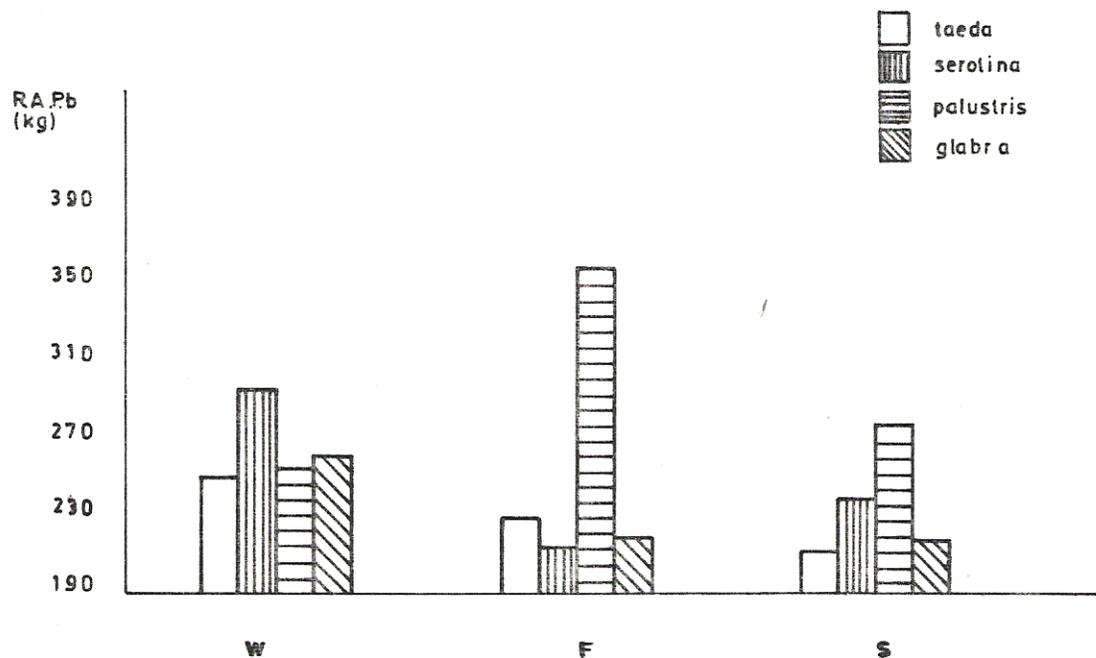


Síntese da análise estatística:

taeda	serotina	palustris	glabra
ns	ns	ns	ns

Legenda: T: taeda; Se: serotina; P: palustris; G: glabra.

FIGURA 19: RESISTÊNCIA AO ARRANCAMENTO DE PARAFUSO (RAPb) -
 -MÉDIAS AJUSTADAS
 B - EFEITO DAS ESPÉCIES



Síntese da análise estatística:

wafer	flake	sliver
ns	P > T, Se, G	ns

Legenda: T: taeda; Se: serotina; P: palustris; G: glabra.

W: wafer; F: flake; S: sliver.

4.2.6 Absorção de Água (AA)

A quantidade em peso de água absorvida pelas chapas de diferentes espécies e geometrias de partículas, estão apresentadas na Tabela 12 e Figuras 20 e 21.

Analisando o efeito da geometria de partículas (Figura 20), pode-se constatar que para todas as espécies, as chapas do tipo "sliver" apresentaram maior absorção de água que as dos tipos "flake" e "wafer", tanto para 2 como 24 horas de imersão em água. Os valores obtidos para chapas dos tipos "wafer" e "flake", diferiram apenas nas espécies *palustris* e *glabra*, onde as chapas do tipo "flake" foram estatisticamente superiores às do tipo "wafer" no *P. palustris*, e as chapas do tipo "wafer" maiores que as do tipo "flake" no *P. glabra*. Vale ressaltar também que as tendências observadas foram estatisticamente idênticas tanto para duas como para 24 horas de imersão.

Com base nessas observações e considerando-se que a espessura nominal das partículas utilizadas neste estudo é a mesma para os três tipos de partículas, além de outras variáveis serem constantes, pode-se afirmar que, a causa mais provável da maior absorção de água pelas chapas do tipo "sliver", se devem à maior área superficial específica das partículas e menor disponibilidade de resina por unidade de área, resultando em maior área de absorção e menor resistência à absorção oferecida pelas películas mais finas da linha de cola entre as partículas.

Contrariando as afirmações feitas por HALLIGAN¹² e KELLY²¹, o comprimento das partículas não influenciou nos resultados obtidos, uma vez que, as partículas do tipo "flake"

TABELA 12. VALORES MÉDIOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA (AA)-2, 24 HORAS

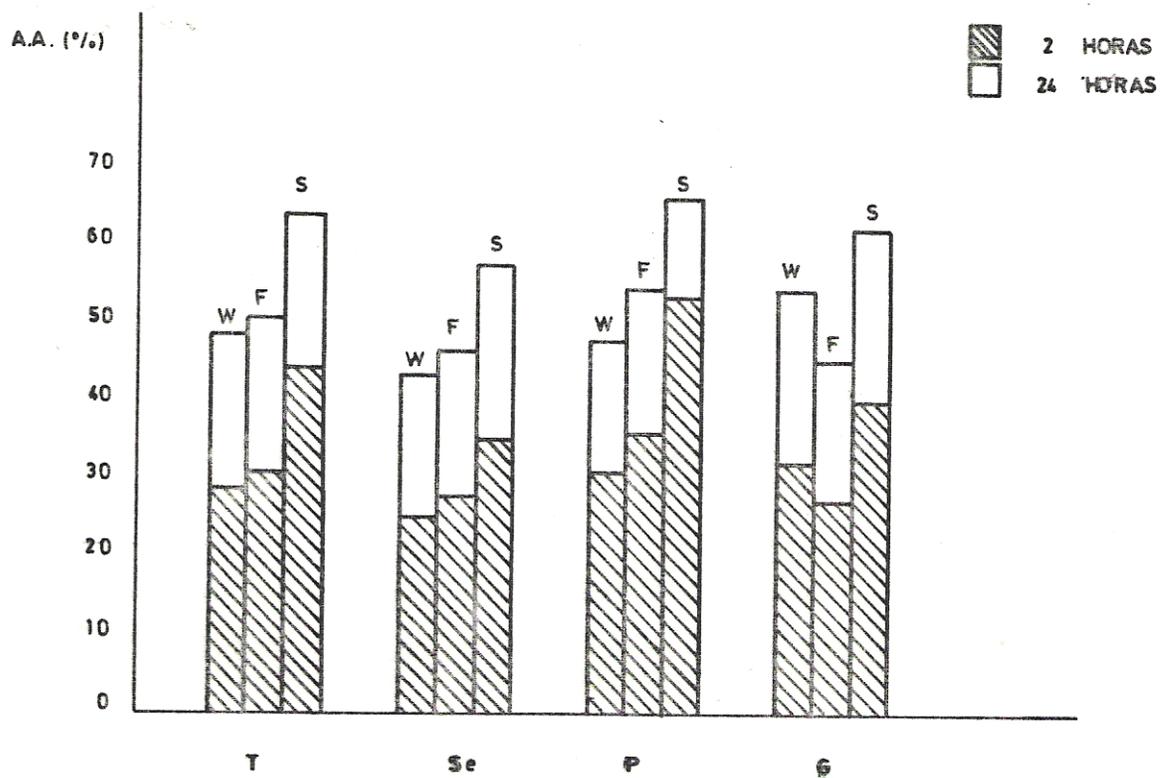
Espécie	taeda			serotina			palustris			glabra		
	W	F	S	W	F	S	W	F	S	W	F	S
Geometria												
AA-2 (%)	26,25	32,41	45,50	22,37	28,46	38,08	25,00	39,94	56,96	27,36	33,54	41,91
AA-24 (%)	45,82	52,87	65,83	40,36	47,80	61,49	42,87	58,17	70,11	48,51	51,76	64,27
Densidade média (g/cm ³)		0,772			0,773			0,762			0,759	
AA-2 (%) médias ajust.	28,71	31,01	44,44	25,26	28,08	35,57	31,52	36,59	53,79	33,34	28,39	41,09
AA-24 (%) médias ajust.	48,80	51,17	64,54	44,12	47,30	58,22	48,52	55,27	67,36	55,10	46,08	63,36

Legenda:

- W : chapas do tipo "wafer";
- F : chapas do tipo "flake";
- S : chapas do tipo "sliver".

FIGURA 20: ABSORÇÃO DE ÁGUA (AA)-2, 24 HORAS- MÉDIAS AJUSTADAS

A - EFEITO DA GEOMETRIA DE PARTÍCULAS



Síntese da análise estatística:

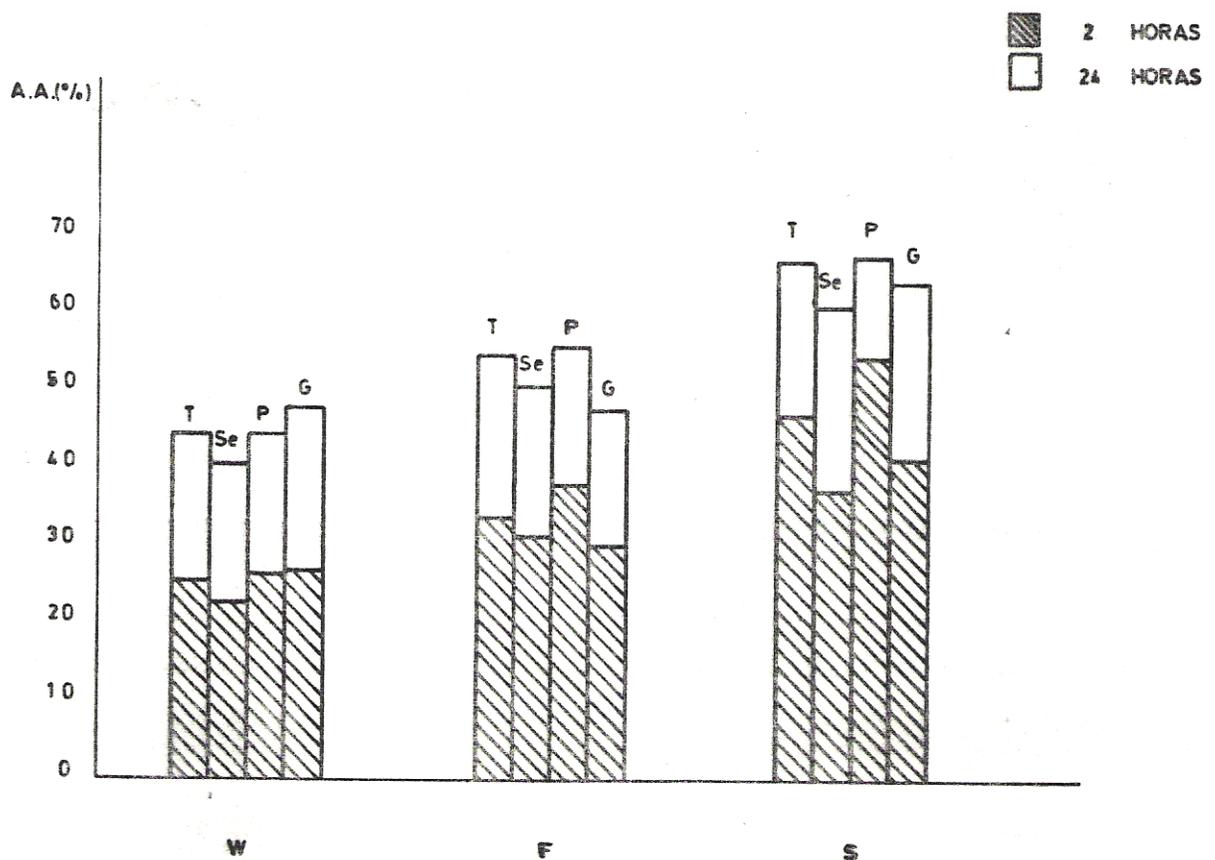
	taeda	serotina	palustris	glabra
AA-2:	S > F, W	S > F, W	S > F, W F > W	S > F, W W > F
AA-24:	S > F, W	S > F, W	S > F, W F > W	S > F, W W > F

Legenda: T: taeda; Se: serotina; P: palustris; G: glabra.

W: wafer; F: flake; S: sliver.

FIGURA 21: ABSORÇÃO DE ÁGUA (AA)-2, 24 HORAS- MÉDIAS AJUSTADAS

B - EFEITO DAS ESPÉCIES



Síntese da análise estatística:

	wafer	flake	sliver
AA-2:	T > Se; P > Se; G > Se	P > G; P > Se	T > Se, G; P > Se, T, G; G > Se
AA-24:	T > Se; P > Se; G > Se, P	T > Se, G; P > Se, G	T > Se; P > Se, G

Legenda: T: taeda; Se: serotina; P: palustris; glabra.

W: wafer; F: flake; S: sliver.

e "sliver" apresentam mesmo comprimento, e as diferenças observadas entre as chapas dos tipos "wafer" e "flake" com diferentes comprimentos de partículas, foram em poucos casos e de formas contraditórias. A largura das partículas influenciou em termos de aumento na área superficial específica das partículas e redução na disponibilidade de resina por unidade de área das partículas do tipo "sliver" em relação aos demais.

A geometria de partículas é relatada por SUCHSLAND⁴¹, como um dos parâmetros mais importantes no controle da estabilidade dimensional das chapas.

Com relação ao efeito das espécies sobre a absorção de água em 2 e 24 horas de imersão na água (Figura 21), a evidência mais marcante foi com relação às chapas de *P. serotina*, que apresentaram menor absorção de água, tanto para as chapas do tipo "wafer" como para as dos tipos "flake" e "sliver".

De uma maneira geral, o *P. palustris* e *P. taeda*, foram as espécies que apresentaram tendências para maior absorção de água, em todos os tipos de chapas, não apresentando diferenças significativas entre si.

Analisando à parte o comportamento geral da espécie *P. palustris*, a sua menor razão de compactação parece ter sido a variável determinante para maior absorção de água, fato este, que confirma as conclusões apresentadas por VITAL *et alii*⁴⁵, de que com a menor razão de compactação das chapas, maior será a absorção de água, devido a maior porosidade e menor quantidade de material. No entanto, as chapas de *P. taeda*, apesar de terem maior razão de compactação,

também apresentaram maior absorção de água. Também com relação a área superficial específica das partículas e disponibilidade de resina por unidade de área, as duas espécies apresentaram condições opostas e os resultados obtidos mostraram comportamentos praticamente similares.

Portanto, nenhuma das variáveis de processamento em estudo foram suficientes para explicar as diferenças em absorção de água 2 e 24 horas entre as espécies estudadas.

Os resultados obtidos por BRITO⁴, para três espécies do gênero *Pinus*, com as densidades da madeira entre 0,42 e 0,47 g/cm³, também não apresentaram diferenças claras que possibilitassem conclusões a respeito das influências das variáveis envolvidas.

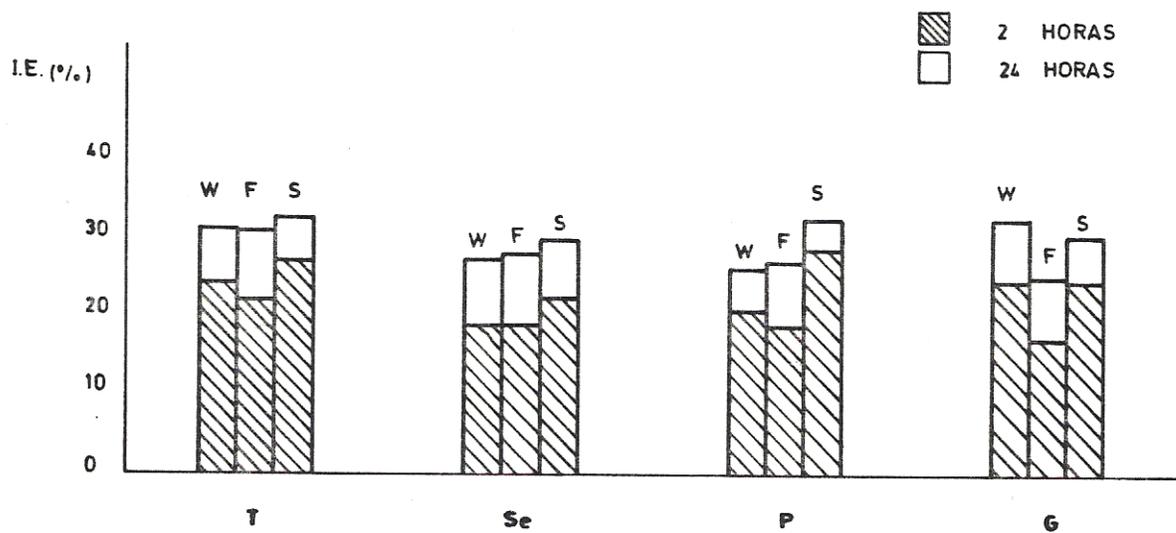
4.2.7 Inchamento em Espessura (IE)

De uma maneira geral, a quantidade de água absorvida está diretamente relacionada com o inchamento em espessura das chapas, conforme pode ser observado através das Tabelas 12 e 13, onde as chapas do tipo "sliver" foram as que apresentaram maior absorção de água e inchamento em espessura que as chapas de demais tipos, em quase todos os casos.

A influência da geometria de partículas sobre o inchamento em espessura - duas horas (Figura 22), pode-se verificar resultados marcantes, onde as chapas do tipo "sliver" apresentaram valores estatisticamente superiores que as chapas dos tipos "flake" e "wafer". Nas espécies *P. palustris* e *P. glabra*, as chapas do tipo "wafer" foram

FIGURA 22: INCHAMENTO EM ESPESSURA (IE)-2, 24 HORAS- MÉDIAS AJUSTADAS

A - EFEITO DA GEOMETRIA DE PARTÍCULAS



Síntese da análise estatística:

	taeda	serotina	palustris	glabra
IE-2:	S > F, W	S > F, W	S > F, W; W > F	S > F; W > F
IE-24:	ns	ns	S > F, W	S > F; W > F

Legenda: T: taeda; Se: serotina; P: palustris; G: glabra.

W: wafer; F: flake; S: sliver.

superiores que as do tipo "flake". Por outro lado, com a imersão das chapas por 24 horas na água, as chapas do tipo "sliver" apresentaram maior inchamento em espessura somente nas espécies *P. palustris* e *P. glabra*, com as chapas do tipo "wafer" sendo superiores que as do tipo "flake" no *P. glabra*. Para as chapas de *P. taeda* e *P. serotina* não foram observadas diferenças significativas entre os três tipos de chapas.

A maioria das observações feitas sobre a absorção de água, são cabíveis para explicar os fatos evidenciados para o inchamento em espessura, devido a alta dependência existente entre estas propriedades. Portanto, pode-se ressaltar mais umavez o efeito da maior área superficial específica das partículas do tipo "sliver" e menor disponibilidade de resina por unidade de área, no aumento da absorção de água e inchamento em espessura da chapa.

Um caso interessante é no que tange às diferenças no inchamento em espessura entre 2 e 24 horas de imersão na água das chapas dos três tipos, onde as do tipo "sliver" apresentaram diferenças bem menores que as dos tipos "wafer" e "flake". Fato este, que provavelmente deve ser causada pela facilidade na liberação das tensões de compressão das chapas do tipo "sliver", devido a menor resistência das ligações entre as partículas, em virtude da menor disponibilidade de resina por unidade de área.

A influência das diferentes espécies no inchamento em espessura, segundo os resultados obtidos por BRITO⁴, para três espécies do gênero *Pinus*, não mostraram relações claras entre a densidade da espécie e o inchamento em espessura.

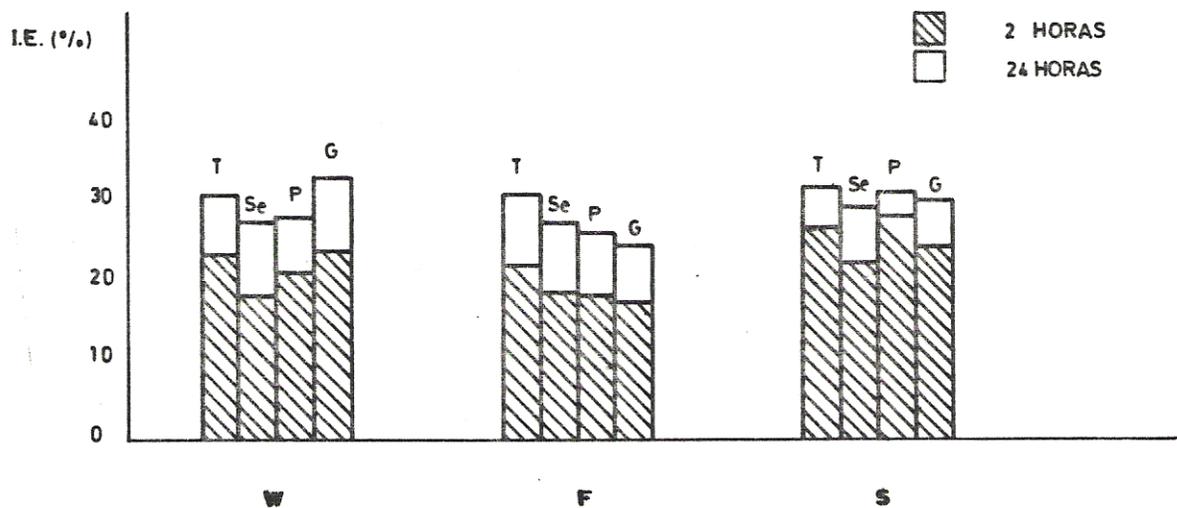
Neste estudo, pode-se observar na Figura 23, que as chapas produzidas com *P. taeda* foram as que apresentaram maior inchamento em espessura em quase todos os casos. Por outro lado, as chapas de *P. serotina* apresentaram menor inchamento em espessura na maioria dos tratamentos em questão. Os resultados para chapas do tipo "sliver", após imersão em água por 24 horas, não apresentaram diferenças significativas entre as espécies.

Embora possa-se evidenciar a ocorrência predominante de dois extremos em inchamento em espessura, ou seja, maior IE do *P. taeda* e menor IE do *P. serotina*, as variáveis de processamento em estudo não puderam justificar com clareza as diferenças observadas. A única evidência marcante, foi a de que as chapas de *P. serotina* foram as que absorveram menor quantidade de água e apresentaram menor inchamento em espessura, portanto, prevalecendo a relação entre a absorção de água e inchamento em espessura. Esta relação não foi observada com clareza para outras espécies, inclusive para as chapas de *P. palustris* que apresentaram alta absorção de água e baixo inchamento em espessura em muitos casos.

Portanto, pode-se concluir que, a nível de espécie, nem sempre aquela que apresenta maior absorção de água, terá também maior inchamento em espessura. Possivelmente, as características peculiares inerentes a cada espécie possa também influenciar nestas relações.

FIGURA 23: INCHAMENTO EM ESPESURA (IE)-2, 24 HORAS- MÉDIAS AJUSTADAS

B - EFEITO DAS ESPÉCIES



Síntese da análise estatística:

	wafer	flake	sliver
IE-2:	T > Se; P > Se; G > Se, P	T > Se, P, G	T > Se, G; P > Se, G
IE-24:	T > Se; G > Se, P	T > P, G	ns

Legenda: T: taeda; Se: serotina; P: palustris; G: glabra
W: wafer; F: flake; S: sliver.

4.2.8 Taxa de Não Retorno em Espessura (TNRE)

Os resultados obtidos para a taxa de não retorno em espessura ou inchamento residual (IR), estão apresentados na Tabela 14 e Figuras 24 e 25.

O efeito da geometria de partículas foi constatado para todas as espécies estudadas, com exceção para as chapas de *P. glabra* (Figura 24). Em todos os casos observados, as chapas do tipo "wafer", foram as que apresentaram menor inchamento residual e as do tipo "sliver", maior inchamento residual.

De uma maneira geral, podem ser evidenciadas as relações diretas existentes entre a absorção de água, inchamento em espessura e inchamento residual.

A diferença não significativa observada na maioria dos casos, entre as chapas dos tipos "sliver" e "flake", demonstram que a largura das partículas não exerce influência sobre o inchamento residual, como foi mencionado por CHILDS, citado por KELLY²¹.

Menor inchamento residual observado para chapas do tipo "wafer", inclusive com relação às do tipo "flake", pode ser atribuído ao efeito do maior comprimento das partículas do tipo "wafer", de acordo com as afirmações feitas por POST³¹.

Entre as espécies estudadas, pode-se observar através da Figura 25, que para os três tipos de chapas, as de *P. palustris*, foram as que apresentaram maior tendência para baixo inchamento residual, seguidas pelas chapas de *P. serotina*. Por outro lado, as chapas de *P. taeda* foram as que apresentaram maior inchamento residual.

TABELA 14. VALORES MÉDIOS DE TAXA DE NÃO RETORNO EM ESPESSURA (TNRE)

Espécie	taeda			serotina			palustris			glabra		
	W	F	S	W	F	S	W	F	S	W	F	S
TNRE (%)	23,74	27,69	27,79	19,51	25,21	23,69	19,87	21,14	23,82	25,80	23,12	26,24
Densidade média (g/cm ³)		0,772			0,773			0,762			0,759	
TNRE (%) médias ajust.	23,69	27,72	27,81	19,40	25,22	23,78	17,61	22,30	24,92	25,05	23,77	26,35

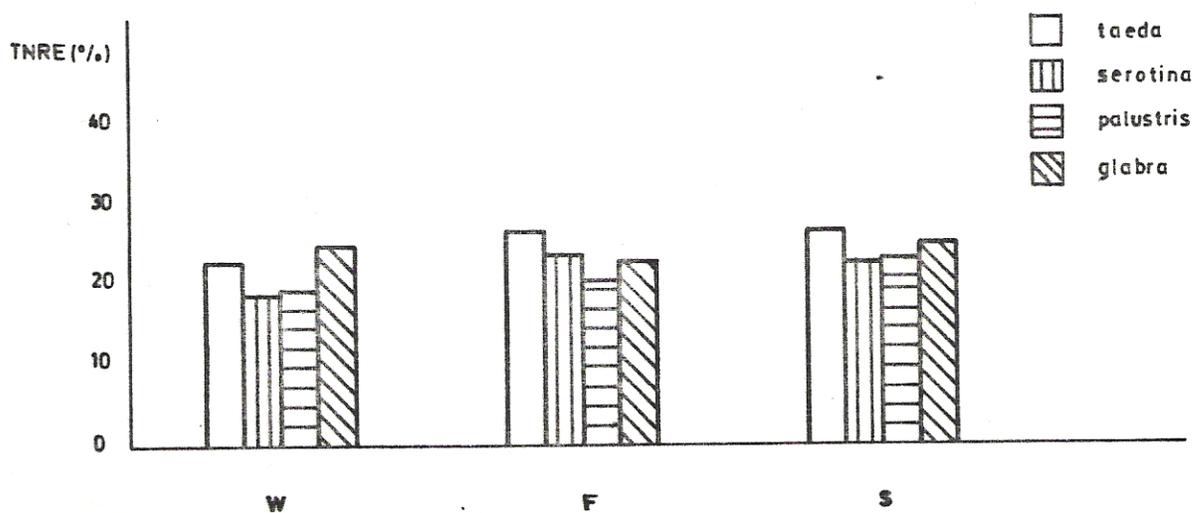
Legenda:

W : chapas do tipo "wafer";

F : chapas do tipo "flake";

S : chapas do tipo "sliver".

FIGURA 25.: TAXA DE NÃO RETORNO EM ESPESSURA (TNRE)
 -MÉDIAS AJUSTADAS
 B - EFEITO DAS ESPÉCIES



Síntese da análise estatística:

wafer	Flake	Sliver
G > Se, P; T > Se, P	T > P; Se > P	T > Se, P; G > Se, P

Legenda: T: taeda; Se: serotina; P: palustris; G: glabra.
 W: wafer; F: flake; S: sliver.

Considerando-se que, o inchamento em espessura é devido aos efeitos da somatória das liberações das tensões de compressão impostas às chapas e também do inchamento das partículas de madeira, como relatado por KELLY²¹, o inchamento residual seria a correspondente variação em espessura devida a liberação das tensões de compressão, que não é recuperada após a secagem. Portanto, é de se esperar uma relação direta entre o inchamento em espessura e inchamento residual.

Neste estudo, observou-se para o *P. palustris* e *P. taeda*, espécies com maiores tendências para baixo e alto inchamento residual respectivamente, as relações diretas entre o inchamento em espessura e inchamento residual.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base na análise dos resultados obtidos, as seguintes conclusões podem ser apresentadas:

- a) A densificação da superfície inferior das chapas de todas as espécies e geometria de partículas foram superiores a densificação da superfície superior. As chapas do tipo "sliver" apresentaram menor densificação superficial que as chapas dos tipos "wafer" e "flake". A possível causa destas diferenças observadas pode ter sido o maior tempo de fechamento da prensa requerido pelas chapas do tipo "sliver".
- b) Os perfis do gradiente vertical de densidade das chapas do tipo "sliver", apresentaram uma tendência para o formato em "M", enquanto que, para as chapas do tipo "wafer" e "flake", somente a metade superior apresentaram esta tendência.
- c) De uma maneira geral, não foi observada uma influência clara das diferentes espécies sobre a formação do gradiente vertical de densidade, portanto, a razão de compactação não foi uma variável determinante para esta propriedade.
- d) Os resultados obtidos comprovam a influência da geometria de partículas sobre o módulo de elasticidade. As

chapas do tipo "wafer" apresentaram maior MOE que as chapas dos tipos "flake" e "sliver", devido principalmente ao maior comprimento das partículas e razão de esbeltez. A menor área superficial específica das partículas e maior disponibilidade de resina por unidade de área das partículas do tipo "wafer", também deve ter contribuído para maior MOE obtido pelas chapas do tipo "wafer".

e) Maior MOE das chapas do tipo "flake" em relação às do tipo "sliver", verificados na maioria dos casos, pode ser atribuído a maior razão de planicidade das partículas do tipo "flake", uma vez que, as partículas do tipo "sliver", foram obtidas pela redução na largura a partir das partículas do tipo "flake".

f) A remoção de uma camada superficial resultou em maior MOE em todos os casos que se detectaram diferenças significativas. Isto se deve à remoção de camadas superficiais menos densificadas, expondo-se as camadas mais densificadas aos esforços em flexão estática.

g) A análise comparativa entre MOE e a densidade média dos corpos de prova com três diferentes espessuras e também do gradiente vertical de densidade, demonstraram que a densidade superficial exerce maior influência nesta propriedade que a densidade média das chapas. Portanto, chapas de menor densidade, com remoção de uma camada superficial (superior e inferior) pode resultar em resistência superior que chapas de maior densidade com espessura original.

- h) Para a maioria das espécies estudadas, o MOR também sofreu influências positivas da razão de esbeltez, definindo a superioridade das chapas do tipo "wafer" sobre as dos tipos "flake" e "sliver".
- i) Ao contrário do MOE, o MOR não sofreu influência de diferentes razões de planicidade das partículas das chapas dos tipos "flake" e "sliver". As diferenças não significativas entre estes dois tipos de chapas, permite afirmar que não houve também o efeito da disponibilidade de resina por unidade de área as partículas.
- j) Embora possa-se constatar diferenças significativas entre as espécies, o efeito da razão de compactação sobre os MOE e MOR não pode ser visualizado com clareza. Portanto, tanto para o MOE como para o MOR, as relações entre estas propriedades e as densidades da madeira e da chapa, apresentadas por KLAUDITZ & STEGMAN, nem sempre é verdadeira, como afirmou também KEINERT Jr.¹⁸.
- k) A influência do gradiente vertical de densidade sobre o MOR, não foi tão pronunciada como no MOE, embora nos casos em que se detectaram diferenças significativas, a remoção de uma camada superficial contribuiu para maior MOR. Pode-se afirmar também que o MOE é melhor indicador de resistência que o MOR.
- l) Com exceção do *Pinus glabra*, para todas as espécies estudadas, as chapas do tipo "sliver" apresentaram maior resistência da ligação interna que as chapas do tipo "wafer".

A maior densificação da porção média das chapas do tipo "sliver" das espécies em questão, foi provavelmente a causa para sua melhor ligação interna. Pode-se concluir também que, para partículas de mesma espessura, a maior disponibilidade de resina por unidade de área não influi para melhora da ligação interna.

m) Entre as espécies, constatou-se na maioria dos casos, o efeito da razão de compactação sobre a ligação interna. As chapas com menor razão de compactação foram as que apresentaram maior resistência da ligação interna.

n) A razão de compactação não influiu nos resultados obtidos para as espécies estudadas. A única conclusão que se pode tirar com base nos casos em que se detectaram diferenças significativas, é a influência das camadas de densificação máxima sobre maior RAPf.

o) Para todas as espécies estudadas, as chapas do tipo "sliver" apresentaram maior absorção de água em 2 e 24 horas de imersão. A causa mais provável para esta ocorrência, pode ser devida a maior área superficial específica das partículas do tipo "sliver" e menor disponibilidade de resina por unidade de área, resultando em maior área de absorção de água e menor resistência à absorção pelas películas mais finas da linha de cola entre as partículas. O maior comprimento das partículas não exerceu influências posi-

vas sobre esta propriedade. As diferenças observadas entre as espécies não pôde ser explicada pelas variáveis de processamento envolvidas.

p) As diferentes geometrias de partículas também exerceram a mesma influência sobre o inchamento em espessura. As chapas do tipo "sliver" apresentaram maior IE que as chapas dos tipos "wafer" e "flake". Entre as espécies, as chapas produzidas com *Pinus taeda*, foram na maioria dos casos, as que apresentaram maior IE, e por outro lado, as de *Pinus serotina* apresentaram menor IE. Entre as espécies não se observaram relações claras entre a absorção de água e inchamento em espessura. Possivelmente, as características peculiares de cada espécie possa influenciar nesta relação.

q) Em todos os casos observados, as chapas do tipo "wafer" foram as que apresentaram menor inchamento residual, e as chapas do tipo "sliver", maior inchamento residual. O maior comprimento das partículas do tipo "wafer", é a causa mais provável para explicar seu menor IR. Não foi observada a influência da largura das partículas sobre o inchamento residual.

r) As chapas de *P. palustris* e de *P. serotina*, de todos os tipos, foram as que apresentaram menor inchamento residual, e as de *P. taeda*, maior inchamento residual. Entre as chapas de *P. palustris* e de *P. taeda*, pode-se observar a relação direta entre o IE e IR, causadas em função da menor e maior tensão de compressão impostas, respectivamente.

s) A análise global das propriedades demonstraram que as chapas do tipo "wafer" são superiores às do tipo "sliver", tanto na resistência à flexão (MOE e MOR), como em termos de estabilidade dimensional, comprovando a sua eficiência tecnológica como tipo de chapas adequado para fins estruturais.

t) De uma maneira geral, as três novas espécies estudadas, *P. serotina*, *P. palustris* e *P. glabra*, demonstraram que são potencialmente viáveis em termos tecnológico para utilização em chapas de partículas, possibilitando inclusive a mistura das espécies, sem prejuízo ou variação de qualidade. A outra vantagem com relação ao *P. palustris* se refere a maior densidade da sua madeira e, conseqüentemente menor volume de material necessário para mesmo peso do colchão e densidade da chapa.

u) Os valores médios de todas as propriedades obtidos para três diferentes geometrias de partículas e quatro espécies, foram superiores aos valores mínimos exigidos pela norma internacional, portanto, essas chapas estão aptas para fins comerciais.

As experiências acumuladas com a realização desta pesquisa, permitem enfocar alguns pontos como recomendações para futuros estudos e linhas de ações:

a) Um estudo específico envolvendo as variáveis: razão de compactação, área superficial específica por unidade de peso e disponibilidade de resina por unidade de área das partículas, deve ser realizado com espécies com maiores diferenças nas densidades da madeira, permitindo com isso

melhor visualização dos seus efeitos sobre as propriedades das chapas.

b) A correlação entre o MOE e a densidade das camadas superficiais extremas é de suma importância para possibilitar formulações de modelos matemáticos envolvendo essas variáveis não destrutivas. Para tal, há necessidade de se medir com precisão a densidade da camada no ponto de carregamento, onde os esforços de tração e compressão atingem valores máximos, e com isso, evitaria também a influência negativa das variações na densificação das camadas no plano horizontal. A utilização de densitômetro pode ser recomendável para essa finalidade.

c) Pode-se comprovar neste estudo que as chapas do tipo "wafer" apresentaram qualidades superiores que as chapas de outros tipos, principalmente com relação às do tipo "sliver", nas propriedades mais importantes e determinantes para usos estrutural e externo. Além destas vantagens, estas chapas apresentam superfícies de boa aparência estética, podendo se qualificar também para uso moveleiro. Estas e outras qualidades necessitam de maior divulgação no mercado no sentido de atrair os produtores e consumidores como uma nova opção para produção e uso destas chapas do tipo "wafer".

d) A consolidação das excelentes qualidades das chapas do tipo "wafer", deve ainda passar por "testes de campo" ou em "serviço", para avaliar as reais resistências e durabilidade em condições de usos estrutural e extreno, sujeitas principalmente às variações climáticas.

SUMMARY

This research was done in order to evaluate the influence of distinct processing variables over particle board properties, due to the different species and particle types utilized. Among properties verified the effects of the vertical density gradient was also in relation with the mechanical properties of boards, specially with MOE and MOR. The species utilized were: *Pinus taeda*, *P. serotina*, *P. glabra* and *P. palustris*, with particles of the "wafer", "flake" and "sliver" types. Conditions for board manufacturing were: board density - 0,75 g/cm³, resin content - 8 %, particle moisture content - 5%, pressing temperature - 180°C, pressing time - 8 minutes, pressure- 40 kg/cm². The densification of the board lower surface was higher than that of the upper surface. Sliverboards showed less superficial densification than the wafer and flakeboards, tending to be M-shaped. The influence of different species over the vertical density gradient could not be observed. Waferboards showed a MOE and MOR higher than the flake and sliverboards, mainly due to greater particle length and slenderness ratio. Nothing could be concluded in relation to the effect of the compaction ratio on those properties. In the MOE, the effect of a higher resin availability per particle unit area, due to their smaller specific superficial area, could be observed. The removal of one and two superficial layers produced an effect upon MOE and MOR values, specially upon the former ascertaining the influence of the density vertical gradient upon them. The flatness ratio influenced the board's MOE only. The internal bond resistance was greater for boards with lower compaction rate. Sliverboards showed stronger internal bond values than other types and the probable reason was the greatest densification of the board's median portion. The greater resin availability per unit area showed no influence in this property. The greater densification of layers showed a positive influence in face screw withdrawal resistance test. Sliverboards presented the highest water absorption and thickness swelling, in the 2 hours and 24 hours tests, probably due to a greater specific superficial area of particles and to a lower availability of resin per unit area. The springback in the waferboards was smaller than in the other board types. Among the species, *Pinus palustris* and *P. serotina* presented respectively the lowest and the greatest springback, showing a direct relationship to TS, demonstrating the effect of the lowest and the greatest compression tension releasing rate. All boards produced showed property values above the minimum required by the American Standard CS 236-66.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard methods of evaluating the properties of wood-base fiber and particle panel materials. In: Annual Book of ASTM Standards, ASTM D 1037-78B. Philadelphia, 1982.
2. AKERS, L.E. Particleboard and hardboard. Oxford, Pergamon Press, 1966. 172 p.
3. BODIG, J. & JAYNE, B.A. Mechanics of wood and wood composites. New York, Nostrand Reinhold, 1982. 712 p.
4. BRITO, E.O. A viabilidade de utilização de espécies de Pinus para a produção de chapas de composição estruturais waferboards. Curitiba, 1984. 104 p. Dissertação. Mestrado. Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Agrárias. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal.
5. BRUMBAUGH, J. Effect of flake dimensions on properties of particle boards. For. Prod. J., 5: 243-46, 1960.
6. COMMERCIAL Standard C.S. 236-66. Mat formed wood particleboard, 1968.
7. ECKELMANN, C.A. Screwholding performance in hardwoods and particleboard. For. Prod. J., 25(6): 30-35, 1975.
8. GATCHELL, C.J.; HEEBINK, B.G. & HEFTY, F.V. Influence of component variables on properties of particleboard for exterior use. For. Prod. J., 16(4): 46-59, 1966.
9. GEIMER, R.L.; MONTREY, H.M. & LEHMANN, W.F. Effects of layer characteristics on the properties of three layer particleboards. For. Prod. J., 25(3): 19-29, 1975.

10. GERARD, J.C. Dimensional behavior of particles in simulated particleboard constructions. For. Prod. J., 16(6): 40-48, 1966.
11. GOMES, F.P. Curso de estatística experimental. 2.ed. São Paulo, EDUSP, 1963. 384 p.
12. HALLIGAN, A.F. A review of thickness swelling in particleboard. Wood Science and Technology, 4: 301-312, 1970.
13. HEEBINK, B.G. Irreversible dimensional changes in panel materials. For. Prod. J., 22(5): 44-48, 1972.
14. _____.; LEHMANN, W.F. & HEFTY, F.V. Reducing particleboard pressing time: exploratory study. USDA For. Serv. Res. Pap. FPL-180, 1982. 13 p.
15. HSE, C.Y.; KOCH, P.; McMILLIN, C.W. & PRICE, E.W. Laboratory scale development of a structural exterior flakeboard from hardwoods growing on southern pine sites. For. Prod. J., 25(4): 42-50, 1975.
16. HSE, C.Y. Properties of flakeboards from hardwoods growing on southern pine sites. For. Prod. J., 25(3): 48-53, 1975.
17. HUJANEN, D.R. Comparison of three methods for dimensionally stabilizing wafer-type particleboard. For. Prod. J., 23(6): 29-30, 1973.
18. KEINERT Jr., S. Laboratory evaluation of *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus robusta* for the manufacture of compositions board. Michigan, 1980. 184 p. Dissertação. Doutorado. Michigan State University.
19. _____. & MATOS, J.L.M. Utilização de *Pinus pinaster* para fabricação de chapas de partículas. Revista Floresta, 17(1/2): 113-120, 1987.
20. _____. Chapas de partículas estruturais a partir de *Pinus* e *Eucalyptus* spp. In: SIMPÓSIO BILATERAL BRASIL-FINLÂNDIA SOBRE ATUALIDADES FLORESTAIS. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 1988. p. 315-326.

32. RICE, J.T. & CAREY, R.H. Wood density and board composition effects on phenolic resin-bond flake-board. For. Prod. J., 28(4): 21-28, 1978.
33. SHEN, K.C. & CARROLL, M.N. Measurement of layer-strength distribution in particleboard. For. Prod. J., 20(6): 53-55, 1970.
34. SMITH, D.C. Waferboard press closing strategies. For. Prod. J., 32(3): 40-45, 1982.
35. SOBRAL Fº, M. The influence of wood furnish type on properties of oriented strand panels. Idaho, 1979. 93 p. Dissertação. Doutorado. University of Idaho Graduate School.
36. SOARES, R.V. Biometria: delineamento de experimentos. Curitiba, Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná, 1982. 98 p.
37. STEWART, H.A. & LEHMANN, W.F. High-quality particleboard from cross-grain, knife-planed hardwood flakes. For. Prod. J., 9(7): 203-215, 1959.
38. STRICKLER, M.D. Effect of press cycle and moisture content on properties of Douglas-fir flakeboard. For. Prod. J., 9(7): 203-215, 1959.
39. SUCHSLAND, O. An analysis of the particleboard process. Q. Bull. Michigan Agr. Exp. Sta. Michigan State Univ., 42(2): 350-372, 1959.
40. _____. The density distribution in flakeboard. Q. Bull. Michigan Agr. Exp. Sta. Michigan State Univ., 45(1): 104-121, 1962.
41. _____. Hygroscopic thickness swelling and related properties of selected commercial particleboards. For. Prod. J., 23(7): 26-30, 1973.
42. _____. Compression shear test for determination of internal bond strength in particleboard. For. Prod. J., 27(1): 32-36, 1977.
43. TALBOT, J.W. & MALONEY, T.M. Effect of several production variables on the modulus of rupture and internal bond strength of boards made of green Douglas-fir planer shavings. For. Prod. J., 7(10): 395-398.

21. KELLY, M.W. Critical literature review of relationships between processing parameters and physical properties of particleboard. USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. FPL-10, 1977. 66 p.
22. LARMORE, F.D. Influence of specific gravity and resin content on properties of particle board. For. Prod. J., 9(4): 131-134, 1959.
23. LEHMANN, W.F. Resin efficiency in particleboards as influenced by density, atomization and resin content. For. Prod. J., 20(11): 48-54, 1970.
23. _____: GEIMER, R.L. & HEFTY, F.V. Factors affecting particleboard pressing time: interaction with catalyst systems. USDA For. Serv. Res. Pap. FPL-207, 1973.
24. _____. & HEFTY, F.V. Resin efficiency and dimensional stability of flakeboards. USDA For. Ser. Res. Pap. FPL-207, 1973. 8 p.
26. _____. Properties of structural particleboards. For. Prod. J., 24(1): 19-26, 1974.
27. MALONEY, T.M. Modern particleboard and dry-process fiberboard manufacturing. San Francisco, Miller Freeman, 1977. 672 p.
28. MARRA, G.G. A materials science approach to wood science. In: INTERNATIONAL SYMPOSIA IN FOREST SCIENCE, 9., Korea, 1982. Proceedings. Korea, National Academy of Sciences, 1982. p. 57-86.
29. MATOS, J.L.M. Ciclo da prensa em chapas de partículas estruturais "waferboards". Curitiba, 1988. 164 p. Dissertação. Mestrado. Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Agrárias. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal.
30. MOSLEMI, A.A. Particleboard. Illinois, Southern Illinois University Press, 1974. v.2, 245 p.
31. POST, P.W. Effect of particle geometry and resin content on bending strength of oak flake board. For. Prod. J., 11: 317-22, 1958.

44. VITAL, B.R.; LEHMANN, W.F. & BOONE, R.S. How species and board densities affect properties of exotic hardwood particleboards. For. Prod. J., 24(12): 37-45, 1974.
45. _____; WILSON, J.B. & KANAREK, P.H. Parameters affecting dimensional stability of flakeboard and particleboard. For. Prod. J., 30(12): 23-29, 1980.
46. WASSERMAN, W. & NETER, J. Applied linear statistical models. Richard D. Irwin, 1974. 842 p.

LABORATÓRIO DE TECNOLOGIA DA MADEIRA - UFPR