Universidade de São Paulo
Instituto de Física de São Carlos
Instituto de Química de São Carlos
Escola de Engenharia de São Carlos

APLICAÇÃO DE RESINA POLIURETANA À BASE DE MAMONA NA FABRICAÇÃO DE PAINÉIS DE MADEIRA COMPENSADA E AGLOMERADA

FABRICIO MOURA DIAS

Tese de Doutorado apresentada à Área Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr

SÃO CARLOS
2005

Livros Grátis

http://www.livrosgratis.com.br

Milhares de livros grátis para download.

Dias, Fabricio Moura

“Aplicação de resina poliuretana à base de mamona na fabricação de painéis de madeira compensada e aglomerada”

Fabrício Moura Dias – São Carlos, 2005

Tese (Doutorado) – Área de Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade de São Paulo, 2004 – Páginas: 116

Orientador: Prof. Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr

1. Compensado 2. Aglomerado 3. painéis 4. Resina poliuretana à base de mamona

I. Título

Para meus pais, José e Laura...com todo meu amor.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Francisco Antonio Rocco Lahr, pela orientação, disponibilidade e amizade.

Aos amigos, Fati (companheira constante, amiga sincera e generosa, porto seguro), Elen (amiga pra todas as horas) e Alexandre Carvalho.

Aos professores do Laboratório de Madeiras, Antonio Alves dias e Carlito Calil Júnior. Aos funcionários, Cido (prestativo e profissional), Silvio, Arnaldo, Jaime, Juliano. À Taninha... boa amiga. Ao Roberto, pela assistência diária e ao Bragatto pela incansável contribuição.

A todos os colegas do Laboratório de Madeiras pelos bons momentos. Sentirei saudades...

Ao José Francisco pela indispensável ajuda na fabricação e ensaio das chapas, objeto deste estudo.

À KEHL Indústria Química pelo fornecimento da resina poliuretana à base de mamona e ao Ricardo Vicino.

A Eucatex pelo fornecimento das partículas de madeira.

A meus irmãos, Fábio, Fabiano e Fabíola. Meus outros irmãos, Leila, Fernanda e Rone.

A meus sobrinhos, alegria permanente, inspiração divina: Gabi, Guga, Sheila, Daniela, Rafael e Fabinho.

Aos amigos de São Carlos, em especial, Samuel, Bia, Brenda, Bárbara, Sr. Luis e D. Nô.

Ao Conselho Nacional de desenvolvimento Científico e tecnológico – CNPq, pela bolsa concedida e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, pelo financiamento do projeto.

À Natureza, mãe verdadeira e evolutiva.

Obrigado!

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS iv

LISTA DE TABELAS vii

RESUMO xiv

ABSTRACT xv

1. INTRODUÇÃO 1

1.1. Objetivos 2

1.1.1. Objetivos gerais 2

1.1.2. Objetivos específicos 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 4

2.1. Adesivo e adesão 4

2.1.1. Mecanismo de adesão 5

2.1.2. Colagem da madeira 6

2.1.2.1. Características físico-químicas do adesivo 6

2.1.2.2. Composição e características da madeira 7

2.1.2. Colagem da madeira 6

2.1.3. Adesivos para madeira 8

2.1.3.1. Uréia-formaldeído 9

2.1.3.2. Fenol-formaldeído 9

2.1.3.3.Resinas poliuretanas 10

2.2. Resina poliuretana à base de mamona 10

2.2.1. Aplicação da resina à base de mamona em madeira 11

2.3. Produtos compostos de madeira 12

2.3.1. Madeira compensada 14

2.3.1.1. Propriedades dos compensados 16

2.3.1.2. Algumas características dos compensados 17

2.3.1.3. Etapas de produção da madeira compensada 19

2.3.1.4. Fatores que influenciam a qualidade da madeira compensada 22

2.3.2. Madeira aglomerada 23

2.3.2.1. Classificação dos aglomerados 24

2.3.2.2. Fatores que afetam o desempenho da madeira aglomerada 25
2.3.2.3. Etapas de produção da madeira aglomerada 27
2.4. O potencial de *Eucalyptus* e *Pinus* para a manufatura de painéis 29
2.5. Mercado de painéis de madeira 32
2.6. Considerações sobre a revisão bibliográfica 33
3. MATERIAIS E MÉTODOS 35
3.1. Materiais 35
3.1.1. Espécies de madeira 35
3.1.2. Resina 37
3.1.3. Emulsão de parafina 37
3.2. Estudo preliminar - primeira fase 37
3.3. Manufatura dos compensados 38
3.3.1. Classificação e secagem das lâminas 38
3.3.2. Processo de colagem 39
3.3.3. Condições de prensagem dos compensados 39
3.3.4. Ensaios físicos e mecânicos dos compensados 41
3.4. Manufatura dos aglomerados 42
3.4.1. Secagem das partículas 42
3.3.2. Processo de formação do colchão 42
3.4.3. Condições de prensagem dos aglomerados 44
3.4.4. Ensaios físicos e mecânicos dos aglomerados 45
3.5. Compensados e aglomerados produzidos com resinas tradicionais para comparação de valores de propriedades físico-mecânicas 46
3.6. Análise por microscopia 47
3.7. Delineamento experimental e análises estatísticas 48
4. RESULTADOS - PRIMEIRA FASE 50
4.1. Resultados para a madeira compensada 50
4.2. Resultados para a madeira aglomerada 57
4.3. Análise dos coeficientes de variação 63
4.4. Conclusões - primeira fase 63

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO - SEGUNDA FASE 65
5.1. Resultados obtidos para a madeira compensada 65
5.1.1. Massa específica aparente e teor de umidade 65
5.1.2. Absorção total de água 67
5.1.3. Inchamento e recuperação de espessura 69
5.1.4. Resistência da colagem ao esforço de cisalhamento e falha na madeira 72
5.1.5. Flexão estática 75
5.1.6. Comparação dos valores de propriedades dos compensados produzidos com a resina à base de mamona com os produzidos com uréia e fenol-formaldeído 80
5.2. Resultados obtidos para a madeira aglomerada 83
5.2.1. Densidade aparente, razão de compactação e teor de umidade 83
5.2.2. Inchamento e absorção de água 85
5.2.3. Tração perpendicular e arranque de parafuso na face 91
5.2.4. Flexão estática 96
5.2.5 Comparação dos valores de propriedades dos aglomerados produzidos com a resina à base de mamona com os produzidos com uréia e fenol-formaldeído 100
5.3. Análise dos coeficientes de variação 103
5.4. Análise por microscopia óptica 103
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS 111
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 117
ANEXO I 124
ANEXO II 137

LISTA DE FIGURAS

1. Classificação dos painéis de madeira 14
2. Posicionamento das lâminas de compensado 15
3. Composição estrutural das chapas de aglomerado. 24
4. Evolução dos últimos anos na produção brasileira de painéis de madeira. 32
5. Montagem dos compensados: a) aplicação do adesivo; b) espalhamento do adesivo e c) sobreposição ortogonal das lâminas. 39
6. Prensagem dos compensados: a) colocação das lâminas na prensa; b) prensagem e c) compensado pronto. 41
7. Representação da formação do colchão de partículas para chapa de aglomerado de 3 camadas. 43
8. Formação do colchão de partículas: a) adição das camadas; b) distribuição uniforme das camadas e c) colchão de partículas. 44
9. Prensagem dos aglomerados: a) Início do processo de prensagem; b) prensagem do colchão e c) chapas prontas. 44
10. Tipos de rupturas no ensaio de flexão estática - compensado prensado à 60ºC. 54
11. Tipos de rupturas no ensaio de flexão estática – compensado prensado à temperatura ambiente. 54
12. Corpos-de-prova rompidos no ensaio de resistência à tração perpendicular: a e b) ruptura na área central do corpo-de-prova e c) ruptura na linha de cola. 61
13. Imagens microscópicas do compensado, com a resina à base de mamona, prensado a 60ºC, com gramatura de 200g/m^2. 102
14. Imagens microscópicas do compensado, com a resina à base de mamona, prensada a 90ºC, com gramatura de 200g/m^2. 103
15. Imagens microscópicas do compensado, com a resina à base de mamona, prensado a 90ºC, com gramatura de 180g/m^2. 104

16. Imagens microscópicas do compensado, com a resina fenol-formaldeído. 105
17. Imagens microscópicas do aglomerado, com resina à base de mamona, prensado a 60ºC. 106
18. Imagens microscópicas do aglomerado, com a resina à base de mamona, prensado a 90ºC. 107
19 Imagens microscópicas do aglomerado com a resina uréia. 108
20. Teste de normalidade para a massa específica aparente do compensado. 128
21. Teste de normalidade para o teor de umidade do compensado. 128
22. Teste de normalidade para a absorção de água total do compensado. 129
23. Teste de normalidade para o inchamento mais recuperação em espessura do compensado. 129
24. Teste de normalidade para a recuperação em espessura do compensado. 130
25. Teste de normalidade para o inchamento do compensado. 130
26. Teste de normalidade da tensão de ruptura, no ensaio de resistência da colagem ao esforço de cisalhamento - ensaio seco, do compensado. 131
27. Teste de normalidade da tensão de ruptura, no ensaio de resistência da colagem ao esforço de cisalhamento - ensaio úmido, do compensado. 131
28. Teste de normalidade do MOR paralelo, na flexão estática do compensado. 132
29. Teste de normalidade do MOR paralelo, na flexão estática do compensado. 132
30. Teste de normalidade do MOE paralelo, na flexão estática do compensado. 133
31. Teste de normalidade do MOE perpendicular, na flexão estática do compensado. 133

32. Teste de normalidade para a densidade aparente dos aglomerados. 134
33. Teste de normalidade para a razão de compactação dos aglomerados. 134
34. Teste de normalidade para o teor de umidade dos aglomerados. 135
35. Teste de normalidade para o inchamento 2 horas dos aglomerados. 135
36. Teste de normalidade para o inchamento 24 horas dos aglomerados. 136
37. Teste de normalidade para a absorção de água 2 horas dos aglomerados. 136
38. Teste de normalidade para a absorção de água 24 horas dos aglomerados 137
39. Teste de normalidade para a tração perpendicular dos aglomerados. 137
40. Teste de normalidade para o arranque de parafuso dos aglomerados. 138
41. Teste de normalidade para o MOR, na flexão estática, dos aglomerados. 138
42. Teste de normalidade para o MOE, na flexão estática, dos aglomerados. 139

LISTA DE TABELAS

1. Composição das partículas de madeira dos aglomerados. 36
2. Valores médios da densidade aparente para as espécies utilizadas. 36
3. Tipo de ensaio e número de corpos-de-prova por chapa de compensado. 42
4. Quantidade de materiais para a manufatura dos aglomerados. 43
5. Tipo de ensaio e número de corpos-de-prova por chapa de aglomerado. 46
6. Formulação dos ingredientes em partes por peso para cada adesivo. 47
7. Composição dos tratamentos para a análise dos resultados dos compensados. 48
8. Composição dos tratamentos para a análise dos resultados dos aglomerados. 49
9. Valores médios de massa específica aparente e teor de umidade dos compensados. 50
10. Valores médios de absorção total de água, inchamento e recuperação de espessura para cada compensado. 51
11. Teste de Tukey para os resultados de absorção total de água dos compensados, para o fator temperatura - primeira fase. 51
12. Teste de Tukey para os resultados de recuperação em espessura dos compensados para o fator temperatura - primeira fase. 52
13. Valores médios do MOR e MOE na flexão estática para cada compensado. 52
14. Teste de Tukey para os resultados de MOR paralelo para o fator temperatura dos compensados - primeira fase. 53
15. Teste de Tukey para os resultados de MOR perpendicular para o fator temperatura dos compensados - primeira fase. 53
16. Valores médios de tensão de ruptura e de falha na madeira, obtidos no ensaio de resistência da colagem ao esforço de cisalhamento para cada compensado. 55

17. Teste de Tukey para os resultados de tensão de ruptura, no ensaio seco, para o fator temperatura dos compensados - primeira fase. 56
18. Teste de Tukey para os resultados de tensão de ruptura, no ensaio úmido, para o fator temperatura dos compensados - primeira fase. 56
19. Requisitos da Norma Européia para classificação de compensados. 57
20. Valores médios de densidade aparente e teor de umidade para cada aglomerado. 58
21. Valores médios de absorção de água e inchamento para cada aglomerado. 59
22. Valores médios do MOR e MOE na flexão estática e tração perpendicular para cada aglomerado. 60
23. Valores médios da resistência à tração perpendicular para cada aglomerado. 61
24. Valores médios da massa específica aparente e teor de umidade de cada compensado. 65
25. Valores médios de absorção total de água para cada compensado. 67
26. Valores do inchamento, inchamento mais recuperação de espessura e recuperação de espessura para cada compensado. 68
27. Teste de Tukey para os resultados de inchamento mais recuperação em espessura para a interação entre os fatores. 69
28. Teste de Tukey para os resultados de inchamento da interação entre os fatores. 70
29. Valores médios de inchamento e recuperação de espessura para alguns compensados encontrados na literatura. 71
30. Valores médios da tensão de ruptura e de falha na madeira para cada compensado. 72
31. Teste de Tukey para os resultados de cisalhamento seco para o fator temperatura. 73
32. Teste de Tukey para os resultados de cisalhamento seco para o fator gramatura. 73

33. Teste de Tukey para os resultados de cisalhamento úmido para o fator temperatura. 73
34. Resultados médios de módulo de ruptura e módulo de elasticidade para cada compensado. 75
35. Teste de Tukey para o MOR paralelo às fibras para o fator temperatura. 76
36. Teste de Tukey para o MOR paralelo às fibras para o fator gramatura. 76
37. Teste de Tukey para o MOR perpendicular às fibras para o fator temperatura. 76
38. Teste de Tukey para o MOR perpendicular às fibras para o fator gramatura. 77
39. Teste de Tukey para o MOE paralelo às fibras para o fator temperatura. 77
40. Teste de Tukey para o MOE paralelo às fibras para o fator gramatura. 77
41. Teste de Tukey para o MOE perpendicular às fibras para o fator temperatura. 78
42. Teste de Tukey para o MOE perpendicular às fibras para o fator gramatura. 78
43. Requisitos para fôrma para concreto. 79
44. Valores médios das propriedades físico-mecânicas dos compensados - comparação entre compensados prensados com diferentes adesivos. 80
45. Valores médios de tensão de ruptura e falha na madeira - comparação entre compensados prensados com diferentes adesivos. 81
46. Valores médios de MOR e MOE na flexão estática - comparação entre compensados prensados com diferentes adesivos. 82
47. Valores médios da densidade aparente, razão de compactação e teor de umidade para cada aglomerado. 83

48. Valores médios para inchamento e absorção de água dos aglomerados. 85
49. Teste de Tukey para o inchamento 2 horas do fator temperatura dos aglomerados. 86
50. Teste de Tukey para o inchamento 2 horas do fator parafina dos aglomerados. 86
51. Teste de Tukey para o inchamento 24 horas do fator temperatura dos aglomerados. 86
52. Teste de Tukey para o inchamento 24 horas do fator parafina dos aglomerados. 87
53. Teste de Tukey para a absorção de água 2 horas do fator temperatura dos aglomerados. 88
54. Teste de Tukey para a absorção de água 2 horas do fator parafina dos aglomerados. 88
55. Teste de Tukey para a absorção de água 24 horas do fator temperatura dos aglomerados. 88
56. Teste de Tukey para a absorção de água 24 horas do fator parafina dos aglomerados. 89
57. Teste de Tukey para a absorção de água 24 horas para a interação dos fatores dos tratamentos dos aglomerados. 89
58. Valores médios obtidos para tração perpendicular e arranque de parafuso na superfície dos aglomerados 91
59. Teste de Tukey para a tração perpendicular do fator temperatura dos aglomerados. 92
60. Teste de Tukey para a tração perpendicular para a interação dos fatores dos tratamentos dos aglomerados. 92
61. Teste de Tukey para o arranque de parafuso na superfície do fator temperatura dos aglomerados. 93
62. Teste de Tukey para o arranque de parafuso na superfície do fator parafina dos aglomerados. 94

63. Valores médios para MOR e MOE na flexão estática dos aglomerados. 95
64. Teste de Tukey para o Módulo de Ruptura na flexão estática do fator interação dos aglomerados. 96
65. Teste de Tukey para o Módulo de Elasticidade na flexão estática do fator interação dos aglomerados. 97
66. Valores médios das propriedades físico-mecânicas dos aglomerados - comparação entre aglomerados prensados com diferentes adesivos. 99
67. Valores médios de TP, AP, MOR e MOE dos aglomerados - comparação entre aglomerados prensados com diferentes resinas. 100
68. Análise de variância para a massa específica aparente dos compensados - primeira fase. 141
69. Análise de variância para o teor de umidade dos compensados - primeira fase. 141
70. Análise de variância para absorção total dos compensados - primeira fase. 141
71. Análise de variância para inchamento dos compensados - primeira fase. 141
72. Análise de variância para recuperação em espessura dos compensados - primeira fase. 142
73. Análise de variância para MOR paralelo dos compensados - primeira fase. 142
74. Análise de variância para MOR perpendicular dos compensados - primeira fase. 142
75. Análise de variância para MOE paralelo dos compensados - primeira fase. 143
76. Análise de variância para MOE perpendicular dos compensados - primeira fase. 143
77. Análise de variância para tensão de ruptura, no ensaio seco, dos compensados - primeira fase. 143

78. Análise de variância para tensão de ruptura, no ensaio úmido, dos compensados - primeira fase. 144
79. Análise de variância para a densidade aparente dos aglomerados - primeira fase. 144
80. Análise de variância para o teor de umidade dos aglomerados - primeira fase. 144
81. Análise de variância para absorção de água 2 horas dos aglomerados - primeira fase. 145
82. Análise de variância para absorção de água 24 horas dos aglomerados - primeira fase. 145
83. Análise de variância para inchamento 2 horas dos aglomerados - primeira fase. 145
84. Análise de variância para inchamento 24 horas dos aglomerados - primeira fase. 146
85. Análise de variância para inchamento 24 horas dos aglomerados - primeira fase. 146
86. Análise de variância para MOR dos aglomerados - primeira fase. 147
87. Análise de variância para MOE dos aglomerados - primeira fase. 147
88. Análise de variância para tração perpendicular dos aglomerados - primeira fase. 147
89. Análise de variância para a massa específica aparente dos compensados. 148
90. Análise de variância para o teor de umidade dos compensados. 148
91. Análise de variância para a absorção de água total dos compensados. 148
92. Análise de variância para o inchamento mais recuperação de espessura dos compensados. 149
93. Análise de variância para recuperação em espessura dos compensados. 149
94. Análise de variância para o inchamento dos compensados. 149

95. Análise de variância para a resistência da colagem ao cisalhamento no estado seco dos compensados. 150
96. Análise de variância para a resistência da colagem ao cisalhamento no estado úmido dos compensados. 150
97. Análise de variância para o MOR na direção paralela às fibras dos compensados. 151
98. Análise de variância para o MOR na direção perpendicular às fibras dos compensados. 151
99. Análise de variância para o MOE na direção paralela às fibras dos compensados. 152
100. Análise de variância para o MOE na direção perpendicular às fibras dos compensados. 152
101. Análise de variância para a densidade aparente dos aglomerados. 153
102. Análise de variância para a razão de compactação dos aglomerados. 153
103. Análise de variância para o teor de umidade dos aglomerados. 153
104. Análise de variância para o inchamento 2 horas dos aglomerados. 154
105. Análise de variância para o inchamento 24 horas dos aglomerados. 154
106. Análise de variância para a absorção de água 2 horas dos aglomerados. 154
107. Análise de variância para a absorção de água 24 horas dos aglomerados. 155
108. Análise de variância para a tração perpendicular dos aglomerados. 155
109. Análise de variância para o arranque de parafuso dos aglomerados. 155
110. Análise de variância para o MOR dos aglomerados. 156
111 Análise de variância para o MOE dos aglomerados. 156

RESUMO

Os painéis compensados e aglomerados são produtos com aplicação difundida, principalmente, na indústria moveleira e no setor da construção civil. Na fabricação destes produtos, tradicionalmente, são usadas as resina à base de fenol-formaldeído e uréia-formaldeído. Porém, há uma constante busca por inovações que visem o aproveitamento dos recursos disponíveis no nosso País. Uma resina alternativa, a resina poliuretana à base de mamona, desenvolvida no Instituto de Química de São Carlos, da Universidade de São Paulo, é um polímero oriundo de recurso natural e renovável. Com base nisto, este trabalho apresenta um estudo sobre a utilização desta resina na manufatura de painéis compensados e aglomerados. Os compensados foram produzidos com lâminas da espécie *Eucalyptus saligna* e os aglomerados com uma composição de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus urophilla* e *Pinus elliottii*. Ambos os painéis foram prensados à temperatura de 60ºC e 90ºC. Nos compensados foram analisadas duas gramaturas, 180 g/m^2 e 200g/m^2. Nos aglomerados industrializados são acrescentadas às partículas de madeira, percentagem de emulsão de parafina, com o objetivo de melhorar suas propriedades higroscópicas. Sendo assim, neste estudo, foram analisados aglomerados manufaturados com e sem a adição de parafina. O desempenho dos painéis foi avaliado por meio de ensaios físico-mecânicos recomendados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas. Nos compensados, os ensaios de resistência da colagem ao esforço de cisalhamento, foram conduzidos segundo recomendações da European Standard. Os resultados apontam para a eficiência de ambos os painéis, quando comparados com valores de propriedades de painéis exigidos por documentos normativos, nacionais e internacionais, e valores encontrados na literatura, para painéis desta natureza. Os resultados mostraram que a resina poliuretana à base de mamona pode ser considerada uma alternativa promissora na manufatura de compensados e aglomerados.

ABSTRACT

Plywood and particleboard are products with spread application, mainly, in furniture industry and building site sector. Those products are produced traditionally with phenol-formaldehyde and urea-formaldehyde resins. However, there is a constant research for innovations which aim the use of available resources in our country. An alternative resin, the castor oil-based polyurethane resin, developed at the São Carlos Institute of Chemistry, University of São Paulo, is an environmentally friendly vegetal oil-based polymer, harmless to humans. This study involves the use of castor oil-based polyurethane resin to manufacture plywood and particleboard. Playwood panels were produced with *Eucalyptus saligna* veneers and particleboards with a composition of *Eucalyptus grandis, Eucalyptus urophilla and Pinus elliottii* particles. Both panels were pressed to 60°C and 90°C temperature. Playwood panels were analyzed in two glue amount, 180g/m^2 e 200g/m^2. Percent of paraffin emulsion is increased in wood particles in industrialized particleboards, to improve their hygroscopic properties. Thus, in that research, particleboards manufactured with and without paraffin addition were analyzed. Plywood and particleboard performances were evaluated based on the results of physical and mechanical tests recommended by the Brazilian code. The plywood's glue-shear strength tests were conducted according to European Standard in plywood. Results appear to the efficiency of both panels, when compared to demanded property values by national and international normative documents and values found in the literature, to those panels. The results showed that the castor oil-based polyurethane resin is a promising glue for plywood and particleboard manufacture.

1. INTRODUÇÃO

A inovação tecnológica é evidenciada pela incansável busca em minimizar esforços, otimizar tempo e economizar em fontes de energia, para o aprimoramento de um produto em si a partir das matérias-primas que o compõe. Neste contexto, a vantagem dos produtos à base de madeira refere-se ao aproveitamento e melhoramento das propriedades da madeira e a utilização de matérias-primas alternativas na fabricação de tais produtos. Esses produtos apresentam consumo ascendente em todo o mundo, inclusive no Brasil.

Dentre os painéis à base de madeira têm-se o compensado, que foi o primeiro painel de madeira de produção em escala industrial, de consumo universal e que, até hoje, permanece como o mais utilizado em todo o mundo, e o aglomerado, também bastante produzido e respectivamente consumido no Brasil.

No processo de fabricação desses painéis utilizam-se adesivos. Os compensados são produzidos tradicionalmente com a resina à base de uréia-formaldeído, para indicação em uso interior e com a resina fenol-formaldeído para uso exterior. Grande parte dos aglomerados é produzida com a resina uréia-formaldeído. A cura destas resinas é processada a altas temperaturas, 130 a 160oC.

A resina à base de uréia-formaldeído apresenta duas inconveniências: perde resistência quando atua sob a ação da umidade por tempo relativamente curto e, na prensagem, há a emanação de formaldeído, tornando seu emprego problemático em países cujo controle

ambiental é rigoroso. A resina à base de fenol-formaldeído, derivada do petróleo, é de alto custo, o que restringe as aplicações dos painéis com ela produzidos.

Com base nisto, há a necessidade e a conveniência da condução de pesquisas no sentido de encontrar substitutos de igual qualidade e desempenho às resinas tradicionais, tendo como base matéria-prima, a partir de fontes naturais renováveis, para a fabricação de painéis à base de madeira.

Uma resina alternativa oriunda de recurso natural e renovável, a poliuretana à base de mamona, é classificada como impermeável, apresenta a característica de não agressividade ao meio ambiente e ao ser humano e é oriunda de tecnologia brasileira, desenvolvida no Instituto de Química de São Carlos, da Universidade de São Paulo. Sua cura é processada com temperatura ambiente, podendo ser acelerada com temperatura de 60 a 90oC. Tais características evidenciam o potencial da mencionada resina, o qual será demonstrado no decorrer do trabalho.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivos gerais

Caracterizar painéis compensados e aglomerados com a resina poliuretana à base de mamona. Os compensados foram fabricados com lâminas de madeira da espécie *Eucalyptus saligna* e os aglomerados a partir de cavacos de madeira compostos de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus urophilla* e *Pinus elliottii*.

1.1.2. Objetivos específicos

a) Avaliar a eficiência dos compensados e aglomerados fabricados com a resina poliuretana à base de mamona por meio de ensaios físicos-mecânicos descritos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, em seus textos normativos.

b) Determinar a influência de algumas variáveis envolvidas no processo de fabricação dos painéis compensados e aglomerados, em particular a temperatura de prensagem, a gramatura do adesivo e a utilização de emulsão de parafina.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Adesivos e adesão

O uso de adesivos é bastante antigo. Segundo Hoekstra e Fritzius (1951), Reinhart e Callomon (1959) e Skeist (1962) colas de peixe, de leite coalhado, entre outras, eram empregadas pelos egípcios para unir objetos de madeira a mais de 3000 anos antes de Cristo.

Após a primeira guerra mundial, onde ainda predominavam os adesivos obtidos à base de proteínas animais, começaram a surgir adesivos com características de utilização a temperatura ambiente e resistentes à água. Estes adesivos são empregados até hoje pelos países mais desenvolvidos, na colagem de madeira para uso em interiores.

Na década de 30 foi empregada, como uso em escala industrial na madeira, a primeira resina sintética à base de fenol-formaldeído. Nesta época, foi introduzido também um adesivo à base de uréia-formaldeído, para a produção de móveis e madeira compensada para interiores (Skeist, 1962).

Com a segunda guerra mundial novos adesivos foram desenvolvidos como o resorcinol-formaldeído e os primeiros adesivos poliuretanos. Segundo Mantilla Carrasco (1984)

para ser possível a produção de madeira compensada, foram misturados adesivos à base de resina resorcinol com os adesivos à base de resinas fenólicas.

Posteriormente, com a evolução da química das macromoléculas, uma grande variedade de polímeros, com melhores características quanto ao seu aspecto adesivo, foram desenvolvidos possibilitando grande expansão das indústrias de adesivos à base de resinas vinílicas, de poliester, poliuretanas, etc. (Mantilla Carrasco, 1984).

Segundo Jesus (2000) no início da década de oitenta, importante contribuição nacional foi dada ao estudo dos adesivos à base de resinas poliuretanas, pelo Departamento de Química e Física Molecular, do atual Instituto de Química de São Carlos. Os pesquisadores do Grupo de Química Analítica e tecnologia de Polímeros desenvolveram uma resina poliuretana à base de mamona, que possui várias vantagens como: manipulação em temperatura ambiente, grande resistência à ação da água e de raios ultravioleta, grande resistência mecânica e oriunda de um recurso natural renovável, facilmente encontrado na maior parte do território nacional.

2.1.1. Mecanismo de adesão

Iwakiri (1998), explica os mecanismos envolvidos no processo de adesão pelas teorias mecânica, teoria da difusão de polímeros e teoria da adesão química. Na teoria mecânica, o adesivo líquido devido a sua fluidez penetra em substratos porosos, como a madeira, ocorrendo posteriormente a solidificação, com a formação de "ganchos" fortemente presos entre os substratos.

De acordo com a teoria da difusão de polímeros, a adesão ocorre através da difusão de segmentos de cadeias de polímeros, a nível molecular, enquanto, na teoria da adesão química, a adesão ocorre através de ligações primárias (iônicas ou covalentes) e/ou forças secundárias intermoleculares.

Segundo Vick (1999), estas forças só podem ser desenvolvidas quando as moléculas estão muito próximas entre si. Por isto aplica-se tanto em colagem a frio, quanto em colagem a quente uma certa pressão sobre as superfícies das juntas a serem coladas.
Na adesão ocorre uma atração entre uma superfície sólida e uma segunda fase. Esta segunda fase pode consistir de partículas individuais, como pequenas gotas, pó, etc., ou de uma película líqüida e sólida (Houwink e Salomon, 1965).

2.1.2. Colagem da madeira

Para garantir uma boa colagem da madeira, vários fatores sobre a madeira e o adesivo devem ser considerados. Segundo Kollmann et al. (1975), Vick (1999) e Franklin adhesives (2003), esses fatores são relacionados à preparação das superfícies a serem coladas, como o ângulo da fibra, condições da superfície, umidade, se a superfície está uniforme, se foi tratada com preservadores de madeira contra microorganismos, fogo e agentes atmosféricos.

No processo de colagem de madeiras é importante observar a formulação do adesivo e a quantidade de adesivo a ser aplicado em função da espécie, espessura da lâmina e área superficial específica das partículas de madeira. As variáveis do ciclo de prensa, em relação à temperatura, pressão e tempo de prensagem também influenciarão a qualidade de colagem (Vick, 1999).

Franklin adhesives (2003) alguns fatores que influenciam na colagem de madeiras, entre eles, as características físico-químicas do adesivo e a composição e características da madeira, merecem destaque.

2.1.2.1. Características físico-químicas do adesivo

A viscosidade, grandeza que caracteriza a existência de atrito entre as moléculas de um fluido, que se manifesta por meio do escoamento, é uma característica importante a se

observar no adesivo. Segundo Franklin adhesives (2003), quanto maior a viscosidade, maior dificuldade de esparramento, menor propriedades de umectação, menor penetração do adesivo na estrutura capilar da madeira, resultando numa linha de cola mais espessa com qualidade inferior de colagem. Quanto menor a viscosidade, maior a penetração do adesivo e absorção pela madeira, o que pode resultar numa linha de cola faminta.

Outra característica, o tempo de gelatinização, ou gel time, é definido por Iwakiri (1998) como o tempo desde a preparação do adesivo para a sua utilização até o endurecimento (fase de gel), quando atinge a máxima elasticidade. A importância do "gel time" está relacionada à vida útil do adesivo ou tempo de "panela", quando se atinge o ponto de máxima viscosidade possível para a sua aplicação.

As resinas são compostas de componentes sólidos, que após a "cura", formam a linha de cola, responsável pela ligação entre os substratos e, os componentes líquidos (voláteis) que são os solventes orgânicos, que são evaporados durante a prensagem.

Em colagem de madeiras, é importante considerar também a influência do pH tanto da madeira como da resina. O pH da resina a ser utilizada na madeira não deve ultrapassar os limites extremos de 1,5 e 11, pois podem resultar na degradação das fibras e prejudicar a qualidade do produto colado. O pH baixo pode levar a formação excessiva de espuma na mistura, prejudicando a sua aplicação.

2.1.2.2. Composição e características da madeira

As principais propriedades da madeira que influenciam no processo de formação e performance da ligação são as anatômicas, físicas, químicas e mecânicas.

As propriedades anatômicas da madeira, sua estrutura, podem influenciar a colagem. As diferenças de dimensões dos elementos celulares (o tamanho, disposição e freqüência

das cavidades celulares) estão relacionadas com a porosidade e permeabilidade da madeira (Kollmann e Côté, 1984). Segundo Selbo (1975), o cerne da madeira apresenta maior densidade, porosidade e concentração de extrativos que o alburno, que pode, prejudicar a qualidade da colagem.

A densidade e o teor de umidade são as propriedades físicas da madeira mais importante em termos de colagem. Em madeiras de baixa densidade, mais porosas, ocorre maior penetração do adesivo e poderá resultar na linha de cola faminta. Madeiras de alta massa específica apresentam maior alteração dimensional, o que gera maiores tensões na linha de cola (Vick, 1999). O conteúdo de umidade da madeira e a umidade relativa do ambiente, onde está sendo processada a colagem, influencia na ligação madeira/adesivo (Kollmann e Côté, 1984; Vick, 1999).

A madeira é constituída por componentes majoritários – celulose, polioses e lignina, mais os componentes minoritários – extrativos e minerais (cinzas) (Tsoumis, 1991). A concentração excessiva de extrativos na superfície da madeira prejudica o contato adesivo-madeira.

Outra propriedade da madeira, que influencia na colagem, é a propriedade mecânica. Quanto maior a resistência da linha de cola em relação à resistência da madeira, maior será a percentagem de falhas na madeira na interface com a linha de cola (Selbo, 1975).

2.1.3. Adesivos para madeira

Os adesivos são classificados por Skeist (1962) e Selbo (1975) de acordo com a sua composição química, como inorgânicos ou orgânicos.

Os adesivos inorgânicos mais comuns são à base de silicatos, que produzem ligações com elevada resistência mecânica. Os adesivos orgânicos são divididos em sintéticos e naturais. Os adesivos orgânicos sintéticos são os mais importantes e mais empregados

pela indústria madeireira por apresentarem grande resistência à ação da água e por não sofrerem ação de microrganismos. Podem ser classificados em termofixos e termoplásticos (Selbo, 1975; Oliveira e Freitas, 1995).

Os adesivos termofixos endurecem por meio de reações químicas ativadas pela temperatura ou catalisadores. São resistentes a umidade e ao calor. Entre os pricipais adesivos podem ser citados: o fenol-formaldeído, a uréia-formaldeído e os poliuretânicos (Watai, 1987; Subramanian, 1984).

2.1.3.1. Uréia-formaldeído (UF)

Esta resina foi desenvolvida no início da década de 30, sendo a mais utilizada atualmente. Peterson (1964) e Samlaic (1983), afirmam que esses adesivos perdem resistência quando atuam sob a ação da umidade por tempo relativamente curto. Possuem um sério inconveniente em virtude da emanação de formaldeído e seu emprego é problemático em países cujo controle ambiental é rigoroso.

Segundo Pizzi (1983) esta resina é utilizada na fabricação de compensados e em maior proporção nos aglomerados. Esta resina apresenta coloração branco leitoso, pH na faixa de 7 a 8, teor de sólidos em torno de 65%. Sua cura é processada através da redução do pH (ácido) com a adição de catalisador. Na cura a quente utiliza-se como catalisador o cloreto ou sulfato de amônia. Sua cura a quente é processada com temperatura de 95 a 120ºC.

2.1.3.2. Fenol-formaldeído (FF)

Segundo Peterson (1964), FF são adesivos formados a partir de resinas fenólicas sintéticas, primeiras a serem empregadas com aplicação comercial em madeiras. Um dos fatores negativos é o alto custo do fenol, cuja matéria-prima é o petróleo.

Esta resina é muita utilizada na produção de compensados (navais e estruturais) e madeira laminada colada. Pizzi (1983) e Iwakiri (1998) apresentam como principais características desta resina: alta resistência à umidade e alta durabilidade, coloração marrom avermelhado, teor de sólidos em torno de 47%, pH na faixa de 11 – 13, temperatura de cura compreendida de 130 a 150ºC e maior custo em relação à resina UF.

2.1.3.3.Resinas poliuretanas

Seu emprego teve início na produção de chapas de madeira aglomerada. Estas chapas tinham as mesmas características das produzidas com adesivos fenólicos e usadas externamente. Os estudos desenvolvidos indicaram que o emprego dessas chapas, com esta destinação e coladas com adesivos à base de poliuretano, apresentavam propriedades superiores às das chapas coladas com o adesivo fenólico. Possuem a vantagem de não emanar formaldeído, o que proporciona também um produto com alta resistência à umidade (Peterson, 1964).

2.2. Resina poliuretana à base de mamona

Há uma tendência mundial na procura de materiais biodegradáveis, não poluentes e derivados de biomassa. Segundo Araújo (1992) esta tendência alavancou as pesquisas com poliuretanos derivados de óleo de mamona, ampliando assim, novas perspectivas para o seu desenvolvimento.

Conhecida internacionalmente como “Castor Oil” e no Brasil por Caturra, a mamona *(Ricinus communis)* é uma planta da família das euforbiáceas, de onde é extraído o óleo de mamona, também conhecido como óleo de rícino. Esta planta é encontrada em regiões tropicais e sub tropicais, sendo muito abundante no Brasil.

A partir do óleo de mamona é possível sintetizar polióis e pré-polímeros com diferentes características que, quando misturados, dão origem a um poliuretano. Esta mistura poliól

e pré-polímero (à base de mamona), a frio, leva a reação de polimerização da mistura. Esta reação conduz à formação da poliuretana, podendo-se variar a porcentagem de poliól, que definirá maior ou menor dureza, bem como o emprego de catalisador adequado a fim de aumentar a velocidade da reação.

Claro Neto (1997) caracterizou as propriedades físico-quimicas do polímero poliuretano, bicomponente, derivado de óleo de mamona, desenvolvido para ser utilizado como material em implantes ósseos. Através do estudo o autor apresenta que a decomposição térmica deste polímero inicia em temperaturas acima de 150ºC. No estudo de Claro Neto (1997) foi sintetizado pré-polímero a partir do difenilmetano di-isocianato (MDI), pré-polimerizado com um poliól também derivado de óleo de mamona.

Araújo (1992) conduziu uma série de ensaios a fim de determinar as características das várias composições de resinas poliuretanas baseadas no óleo de mamona. Com relação à estabilidade térmica das poliuretanas, verificou-se através dos termogramas dos ensaios, que até 220°C ocorre apenas uma pequena perda de massa, o que evidencia a estabilidade térmica das resinas até esta temperatura.

2.2.1. Aplicação da resina à base de mamona em madeira

Jesus (2000) apresenta estudo do comportamento da resina poliuretana à base de mamona para o emprego em madeira laminada colada (MLC). O autor avaliou a eficiência do adesivo através dos ensaios mecânicos de resistência ao cisalhamento, tração normal e tração paralela às fibras. Através desses resultados determinou os parâmetros de colagem como: viscosidade, tempo de pressão de colagem e tempo de cura. Os resultados apresentados pelo autor mostraram que o adesivo a base de mamona é uma boa alternativa para a utilização tecnológica da madeira.

A resina poliuretana à base de mamona estudado por Jesus (2000) é do tipo bicomponente, composto pelo poliól B1640 e pelo pré-polímero A249, de cura a frio.

Após a mistura dos componentes sua viscosidade aumenta e seu tempo de utilização é de aproximadamente 20 minutos, tempo de trabalhabilidade reduzido, o que dificulta sua aplicação em estruturas de MLC.

Azambuja (2002) determinou parâmetros adequados para a colagem de MLC com o adesivo á base de óleo de mamona e analisou a resistência da linha de cola e o desempenho estrutural das vigas de MLC, por intermédio do ensaio mecânico de resistência à flexão.

A resina utilizada por Azambuja (2002) é bi-componente poliuretana à base de óleo de mamona, constituída a partir do poliol 25040 e do pré-polímero A249. O Instituto de Química de São Carlos - USP desenvolveu esta nova variação de adesivo com a finalidade de melhorar suas qualidades de viscosidade, tempo de cura, trabalhabilidade, facilitando sua aplicação em MLC. A proporção utilizada para o preparo deste adesivo foi de uma parte, em peso, de pré-polímero A249 para uma parte, em peso, de poliol 25040.

Silva e Gonçalves (2002) avaliaram as propriedades de chapas de fibra de média densidade (MDF), com madeira de reflorestamento e a resina poliuretana a base de óleo de mamona. O adesivo utilizado, do tipo monocomponente com processo de estabilização pela umidade do ar, apresentava como principal característica, a concentração de 30% de sólidos (parte ativa) e 70% de solventes. Foram adotadas duas condições para confecção das chapas: preparação de chapas com 5% e 10% de adesivo sobre a parte ativa. Segundo os autores a resina poliuretana à base de mamona pode ser indicado para a confecção de MDF.

2.3. Produtos compostos de madeira

A madeira sólida apresenta estrutura heterogênea e anisotrópica, o que limita o seu uso. As dimensões, largura e comprimento das peças, são limitados ao diâmetro e altura da

árvore. Segundo Kollmann e Côté (1984) e Bodig e Jayne (1982) a madeira sólida é limitada quanto à sua anisotropia por apresentar propriedades físico-mecânicas distintas nos sentidos tangencial, radial e longitudinal. Outra limitação corresponde aos defeitos naturais tipos nós, inclinação da grã, percentagem de lenho juvenil e adulto, etc.

Tais limitações abriram espaço para a utilização de adesivos, como matéria prima de grande importância em colagem de madeiras. Ampliou-se o conceito de redução da madeira em pequenos elementos de forma e geometria variadas, os quais são posteriormente reconstituídos através de ligações com a aplicação de adesivo sob pressão e calor em produtos à base de madeira.

Segundo Oliveira e Freitas (1995) estes compostos de madeira possuem, às vezes, propriedades melhores do que a madeira de origem; é o caso dos painéis compensados, produto que utiliza como matéria-prima o que há de melhor em uma floresta, toras de diâmetros elevados, concentricidade perfeita e com o menor número de defeitos possíveis.

De acordo com Bodig e Jayne (1982), os compostos de madeira podem ser classificados em dois grupos: laminados e particulados. Os laminados utilizam processos de colagem de lâminas em produtos como os compensados, LVL e a madeira laminada colada. Os particulados utilizam partículas e fibras de madeira e, se caracterizam pela estrutura descontínua, tais como, painéis de madeira aglomerada, chapas de fibra e chapas minerais. Brasil (2002) apresenta uma classificação para os painéis de madeira e seus elementos (Figura 1) baseados no guia da FAO[1].

[1]FOOD AND AGRICULTURAL ORGANIZATION - FAO. Yearbook of forest products. Rome, 2001. 243p. *FAO Forestry Series*. n.34; *FAO Statistics Series*. n.157)

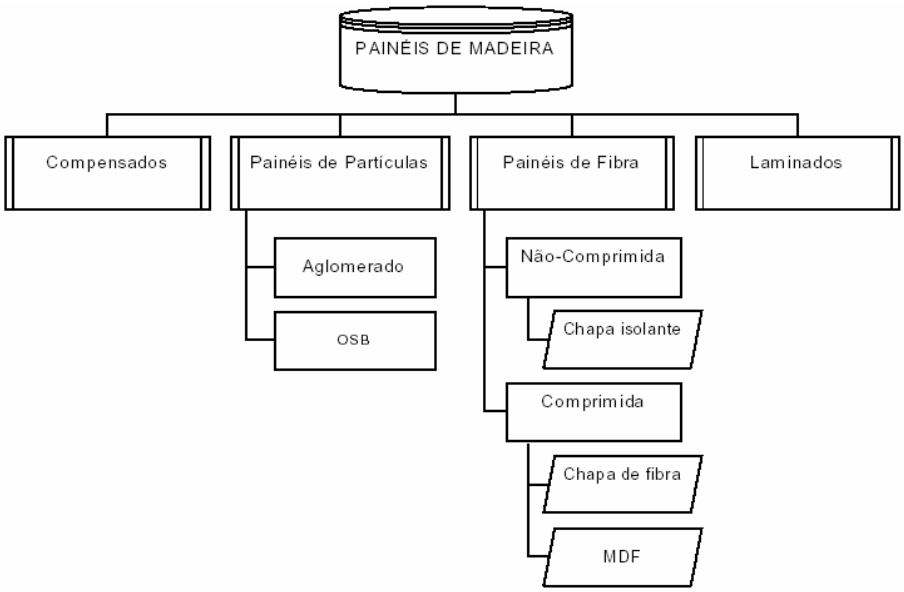


Figura 1 - Classificação dos painéis de madeira. Fonte: FAO apud Brasil (2002).

2.3.1. Madeira compensada

Segundo Interamnense (1998), a madeira compensada, ou compensado, é um painel formado por lâminas de madeira, justapostas em camadas ímpares, coladas entre si de maneira que a direção da grã de camadas adjacentes formem um ângulo de 90º entre si. A designação do uso final do compensado é função da espécie, da qualidade das lâminas, e do tipo de adesivo usado na fabricação da chapa.

Esta colagem de lâminas de madeira sobrepostas, representada na Figura 2, com as fibras cruzadas perpendicularmente, propicia grande resistência física e mecânica ao compensado. Segundo Revista da madeira (1997), o compensado é produzido sob duas principais especificações: a) para uso interno com colagem à base de resina de uréia-formaldeído, sendo empregado basicamente na indústria moveleira; b) para uso externo com colagem à base de resina de fenol-formaldeído, sendo normalmente utilizado na construção civil.

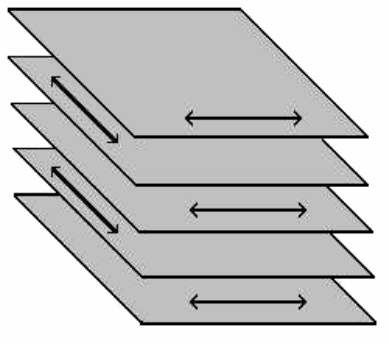


Figura 2 - Posicionamento das lâminas de compensado. Fonte: Keinert Jr. (1984).

Segundo Oliveira e Freitas (1995), a elevada estabilidade dimensional do compensado é adquirida, com sua formação em número ímpar de lâminas. Outras vantagens do compensado são: as possibilidades de obtenção de painéis de grandes dimensões, a aplicação de preservativos durante a produção do painel (adicionados à cola), a seleção das lâminas com maior qualidade para capa e a possibilidade de mesclar espécies diferentes de madeira em um mesmo painel, o que permite uma redução no custo de produção e, conseqüentemente, no preço do produto final (Archer, 1948; Tomaselli e Scheffer, 1999; Macedo e Roque, 2002).

Segundo Gonçalves (2000) para produzir compensado pode-se utilizar tanto lâminas de madeiras leves como espécies de madeira dura. Olin (1990) afirma que, na confecção do compensado, as lâminas podem ser compostas de mais de uma espécie, desde que as lâminas simétricas em relação ao centro sejam da mesma espécie, e de mesma espessura.

Quando utilizado o adesivo especificado para compensados de uso exterior, a linha de cola utilizada para unir as lâminas é tão durável quanto à própria madeira. Segundo Olin (1990), compensados para uso exterior podem ser expostos ao tempo sem uma pintura extra ou tratamento, sem que isto afete a durabilidade da linha de cola ou da vida útil do painel.

2.3.1.1. Propriedades dos compensados

Steck (1995) afirma que uma das propriedades físicas mais importantes dos produtos derivados da madeira é a densidade. Sendo dependente da quantidade de adesivo e da pressão utilizada, a densidade do compensado é geralmente maior que a da madeira maciça utilizada como matéria prima.

Segundo Oliveira e Freitas (1995) e Steck (1995) assim como a madeira sólida, as lâminas são higroscópicas e, portanto, o teor de umidade do compensado depende das condições climáticas do ambiente a que está exposto. O teor de umidade de equilíbrio do compensado com o ambiente é menor que o da madeira maciça, devido às linhas de cola.

Assim como a madeira maciça, o compensado também está sujeito a variações dimensionais devido à variação do teor de umidade, da temperatura e de outros fatores. Segundo Oliveira e Freitas (1995) o compensado apresenta estabilidade dimensional muito superior a outros produtos à base de madeira. Keinert Jr. e Alberto (1991) afirmam que, a estabilidade dimensional em compensados é importante, especialmente, quando o produto se destina para usos exteriores, fabricação de móveis ou produtos que requeiram maior capacidade de resistir à ação de umidade mantendo suas dimensões originais.

Uma maior resistência ao fogo pode ser dada ao compensado com impregnação e/ou revestimento com produtos apropriados, ou com folhas metálicas não combustíveis. Quando o compensado for utilizado em condições permanentes de umidade, com teor de umidade 20% ou superior, deve ser tratado com preservativo que dê proteção contra fungos e ataque de insetos através das lâminas (FPI[2] apud Stamato, 1998).

[2] FINNISHI PLYWOOD INTERNATIONAL. Handbook of finnish plywood, blockboard and laminboard. CI/SfB Techinical Publication. N.25. Helsinki, sd. 29p.

Uma das propriedades mais importante para os compensados, principalmente os indicados para uso estrutural, é a flexão estática. Na flexão estática, é obtido o módulo de ruptura (MOR) e o módulo de elasticidade (MOE). Segundo Medina (1986) e Almeida (2002), na flexão estática, há uma diferença entre o valor do MOR e MOE obtidos na direção paralela às fibras da lâmina externa, com os obtidos na direção perpendicular.

A diferença dos valores do MOR e MOE, entre as direções dos compensados, devem-se ao fato da madeira apresentar resistência muito superior quando solicitada à tração paralela às fibras, em relação à tração perpendicular que é muito baixa. Quando a lâmina externa estiver posicionada com as fibras paralelas ao vão, o corpo-de-prova apresentará naturalmente maior resistência. Também, quanto maior o número de lâminas internas com fibras paralelas às lâminas externas, mais uniformes será a resistência e a rigidez do compensado, entre as duas direções (Pereyra, 1994).

2.3.1.2. Algumas características dos compensados

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) apresenta algumas normas que especificam as dimensões, suas tolerâncias e as condições específicas a serem seguidas para classificação das chapas de compensado.

A NBR 9531 (1986) classifica as chapas quanto ao local de utilização, através de três tipos básicos:

IR - Interior: chapa colada com cola do tipo interior, destinada a utilização em locais protegidos da ação de água ou de alta umidade relativa. O mínimo de falha na madeira deve ser de 60%, quando submetida ao ensaio de cisalhamento da cola (NBR 9534, 1986) em chapas secas.

IM - Intermediária: chapa colada com cola do tipo intermediária, destinada a utilização interna, mas em ambiente de alta umidade relativa, que pode eventualmente receber a ação de água. O mínimo de falha na madeira deve ser de 60% quando submetida ao ensaio de cisalhamento da cola (NBR 9534, 1986) em chapas saturadas em água fria.

EX - Exterior: chapa colada com cola à prova d'água, destinada ao uso exterior ou em ambientes fechados, onde é submetida a repetidos ciclos de umedecimentos e secagens ou ação d'água. O mínimo de falha na madeira deve ser de 80% quando submetido ao ensaio de cisalhamento da cola (NBR 9534, 1986) em chapas saturadas em água quente.

A NBR 9532 (1986) especifica as condições que devem ser seguidas por cada tipo de compensado. As condições são:

Compensado de uso geral - GER: chapas de madeira compensadas classificadas genericamente como IR, cuja montagem admite pequenos cavalos (miolos sobrepostos) desde que não afetem a qualidade da superfície ou a resistência da chapa.

Forma de concreto - FOR: chapas de madeira compensada classificadas genericamente como EX, cuja montagem admite pequenos cavalos (miolo sobreposto) desde que não afetem a qualidade de superfície ou resistência da chapa. Esse tipo de chapa deve apresentar um módulo de elasticidade mínimo de 4000N/mm^2, obtido no ensaio de flexão estática, de acordo com a NBR 9533 (1986).

Decorativo: são chapas de madeira compensada, classificadas genericamente como IM, cuja montagem admite pequenos cavalos (miolo sobreposto) desde que não afetem a qualidade da superfície. São permitidas emendas desde tenham grã e cor combinadas.

Industrial - IND: são chapas de compensado classificadas genericamente como EX, cuja montagem admite pequenos cavalos, desde que afetem a resistência da chapa.

Naval - NAV: são chapas de madeira compensada, classificadas genericamente como EX, cuja montagem considera todas as lâminas perfeitamente juntas na capa, contracapa e miolo. As laterais devem ser totalmente fechadas, admite-se o uso de resina epóxi ou similar à prova d'água para fechamento de miolo oco não superior à 5mm. Este tipo de chapa deve apresentar um módulo de elasticidade mínimo de 6000N/mm^2, determinado de acordo com a NBR 9533 (1986).

Sarrafeado - SAR: são chapas de madeira compensada, classificadas genericamente como IR, cujo miolo é constituído por sarrafos com largura máxima de 40mm, colados lateralmente ou não, pode ser constituído por três camadas (duas de lâminas e uma de sarrafo) ou um maior número de camadas. Os sarrafos do miolo devem ser uniformes, de modo a não afetarem a qualidade da superfície, permite-se miolo oco de até 50mm, com no máximo 20mm em cada lateral.

2.3.1.3. Etapas de produção da madeira compensada

A seqüência e descrição das etapas de produção de chapas de compensado, são apresentadas por Oliveira e Freitas (1995) e Iwakiri (1998), base para a descrição apresentada a seguir.

a) Preparo da tora

Antes de serem desenroladas ou transformadas em lâminas pelo torno laminador, as toras devem ser descascadas e acondicionadas em tanques contendo vapor ou água quente para que as mesmas se tornem amolecidas e de maior plasticidade, o que propicia a obtenção de lâminas menos quebradiças e mais lisas.

b) Obtenção das lâminas

A produção das lâminas da madeira pode ser obtida por faqueamento, serradas ou corte em torno rotativo (mais utilizado pela indústria). Esse torno é equipado com garras acopladas em semi-eixos, que fazem girar a tora contra a faca que avança automaticamente. A lâmina emerge entre a faca e a contra-faca (ou barra de pressão), onde a função desta contra-faca é de exercer pressão sobre a madeira para prevenir a formação de fendas ou arrancamento de fibras nas lâminas produzidas. Dependendo do tipo e classe de compensado que se quer produzir, várias espessuras de lâminas são desenroladas.

Após serem produzidas no torno, as lâminas são transportadas por esteiras à uma bancada onde existe uma guilhotina, onde as lâminas verdes são cortadas em dimensões pré-estabelecidas e também são retirados os defeitos.

c) Secagem e classificação das lâminas

A secagem das lâminas em secadores industriais é feita em um tempo muito reduzido (alguns minutos), e o teor de umidade final também é baixo, ou seja, por volta de 4 a 6%.

Para uma secagem uniforme e sem aparecimento de defeitos, as operações de secagem de lâminas são feitas automaticamente, mediante programação do sistema, que leva em consideração diversos fatores, tais como espécie de madeira utilizada, espessura das lâminas, entre outros.

As lâminas secas devem ser empilhadas de acordo com a largura e a classe. As técnicas de empilhamento das lâminas também são importantes, a fim de evitar danos principalmente nas bordas das mesmas. Desde que as lâminas não sejam utilizadas

imediatamente após a secagem, estas deverão ser acondicionadas em ambientes com umidade relativa e temperaturas controladas.

d) Junção das lâminas e colagem das bordas

As junções das lâminas mais estreitas devem formar, de preferência, as camadas mais internas do compensado. Esta união é feita de diversas maneiras, através de costuras com máquinas semelhantes àquelas utilizadas em confecções, através de grampeamento, ou com adesivos. Nessa etapa é também importante que se faça a eliminação de defeitos, tais como nós, furos, entre outros, que podem ser cobertos com pedaços sadios do mesmo material.

e) Aplicação do adesivo

Os adesivos podem ser aplicados através de pincéis em pequenas fábricas, entretanto, nas operações de larga escala a aplicação é feita com rolos espalhadores. Atualmente utiliza-se um conjunto de rolos revestidos de borracha, que espalham os adesivos e dosam a espessura desejada da camada de adesivo nas lâminas. Outro método utilizado é através de cortina, que consiste em uma máquina com reservatório e um par de lâminas de aço, sob tal reservatório, que com abertura entre elas possibilita a formação de um filme de adesivo sobre a superfície da lâmina.

f) Prensagem do compensado

Imediatamente após o adesivo ser aplicado nas lâminas, deve-se proceder à montagem do compensado, seguido do carregamento da prensa. No caso da prensagem a frio, após serem empilhados em uma prensa de abertura única e aplicada a pressão adequada, a carga de chapas deve ser presa por grampos bem apertados a fim de manter a pressão original. Após o posicionamento dos grampos, a carga deve ser retirada da prensa e levada para local adequado, à temperatura ambiente.

No caso da utilização de uma prensa aquecida, o seu carregamento deve ser o mais rápido possível, a fim de evitar a secagem do adesivo antes da prensagem. O tempo de prensagem dependerá essencialmente da temperatura da prensa e do tipo de adesivo utilizado. À temperatura de prensagem variando de 100 a 160ºC, o tempo de prensagem poderá limitar a apenas alguns minutos. A pressão de colagem no processo a quente pode variar de 1,2 a 2,0 MPa.

2.3.1.4. Fatores que influenciam a qualidade da madeira compensada

A qualidade do compensado está relacionada ao tipo de adesivo e ao processo de colagem; à qualidade das lâminas e aos fatores do "ciclo de prensa", como a temperatura, o tempo de prensagem e a pressão adotada (Archer, 1948).

De acordo com Nock e Richter (1978) deve-se utilizar um adesivo que garanta uma boa umectação do aderente, isto é, adesivo e aderente devem possuir uma polaridade igual ou semelhante. O adesivo não deve possuir resistência mecânica muito maior que o aderente, isto é, deve ser compatível.

Jankowsky (1982) afirma que a quantidade de adesivo aplicada influencia o tempo de montagem do compensado. Tempo de montagem é o período de tempo decorrido entre a aplicação do adesivo e o momento em que a prensa é fechada. Este tempo deve ser tal, que permita a transferência do adesivo da lâmina com cola para lâmina sem cola, a penetração do adesivo nas células superficiais das lâminas e o umedecimento das mesmas.

Nos fatores dos ciclos de prensa, o tempo, temperatura e pressão são as principais variáveis a serem observadas na prensagem de chapas compensadas. Segundo Chow (1973), a pressão deve garantir uma boa transferência da cola da lâmina espalhada à não espalhada e, manter um bom contato entre as partes mais rugosas durante a cura da resina.

2.3.2. Madeira aglomerada

A madeira aglomerada, ou aglomerado, é um painel formado por partículas de madeira. A madeira é picada, transformada em partículas as quais são submetidas à secagem. O material já seco recebe uma resina, em seguida, é prensado a certa temperatura e pressão, forman assim, o painel (Tomaselli, 2000).

O princípio de fabricação faz com que o aglomerado apresente vantagens em relação a outros produtos compostos de madeira, e também à madeira serrada. Segundo Bodig e Jayne (1982) as vantagens são:

- Eliminação de efeitos da anisotropia – as alterações dimensionais nas direções longitudinal e transversal da chapa são iguais;

- A resistência da chapa no sentido da largura e comprimento é similar;

- Eliminação de fatores redutores da resistência como nós, inclinação da grã, lenhos juvenil e adulto, entre outros;

- Controle das propriedades físico-mecânicas através das variáveis de processo como resina, geometria de partículas, grau de densificação, etc.;

- Menor exigência em termos de matéria-prima como diâmetro, forma do fuste e defeitos;

- Menor custo de produção e mão de obra.

2.3.2.1. Classificação dos aglomerados

Segundo a ABNT, NBR 14810 - 2 (1999) as chapas de madeira aglomerada devem ser classificadas fazendo-se referência à sua densidade, natureza do adesivo, geometria das partículas e característica complementar.

As chapas de aglomerado, segundo NBR 14810 - 2, devem apresentar densidade média, compreendida entre 0,59 a 0,80 g/cm^3. Quanto às partículas, os aglomerados convencionais são produzidos com partículas tipo "sliver". Partículas sliver são partículas quadradas ou retangulares cortadas na seção paralela às fibras da madeira.

Quanto à distribuição das partículas, Maloney (1977) apresenta três configurações básicas de chapas de aglomerado: homogêneas, de múltiplas camadas (geralmente 3 e 5 camadas) e graduadas.

- *Homogêneas* - a mistura das partículas está distribuída ao acaso.

- *Múltiplas camadas* – partículas mais finas nas camadas das faces e mais grossas no miolo. Geralmente adota-se de 15 a 20% de partículas finas em cada face, com o restante do material sendo feito de partículas grossas.

- *Graduadas* - partículas mais finas sobre as faces das chapas, existindo uma variação gradativa do tamanho das partículas através das mais finas nas faces para as mais grossas no centro (miolo).

A Figura 3 apresenta esta composição estrutural dos aglomerados.

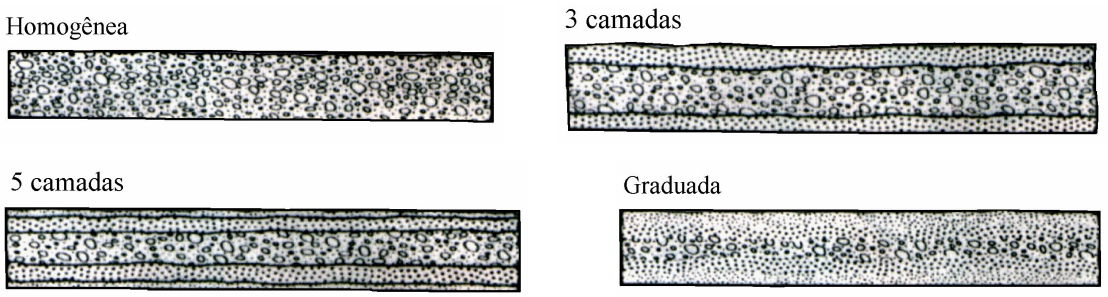


Figura 3 - Composição estrutural das chapas de aglomerado. Fonte: Iwakiri (2003)

2.3.2.2. Fatores que afetam o desempenho da madeira aglomerada

Segundo Maloney (1977), o teor de umidade, e a sua distribuição no colchão contribuem significativamente para as propriedades finais das chapas. Se ocorrer uma variação da densidade em relação às camadas que formam as chapas, as camadas com maior teor de umidade serão mais densificadas. Esta chapa apresentará maior resistência e rigidez à flexão do que as chapas prensadas com um teor de umidade uniforme através do colchão.

A quantidade de adesivo é um fator importante na fabricação de aglomerados. A quantidade a ser utilizado é determinada com base no peso seco das partículas, podendo variar de 5 a 10% (Maloney, 1977).

Os produtos químicos, aditivos, são incorporados durante o processo de aplicação do adesivo, com a finalidade de melhorar algumas propriedades específicas das chapas. Os aditivos mais comuns, empregados na fabricação de aglomerados, de acordo com Maloney (1977) e Iwakiri (2003), são:

- Catalisador ou endurecedor: produtos como cloreto de amônia e sulfato de amônia, utilizado para a cura da resina uréia-formaldeído;

- *Emulsão de parafina:* aplicado na proporção de até 1% base seco das partículas, com a finalidade de reduzir a higroscopicidade das partículas de madeira e melhorar a estabilidade dimensional das chapas;

- *Retardantes de fogo:* compostos químicos como fosfato de amônia, ácido bórico, sulfato de amônia e bromato de amônia, incorporados no material durante o processo de produção, ou através da impregnação em chapas após a prensagem;

- *Repelentes de fungos e insetos:* compostos químicos incorporados no material durante o processo de produção na proporção de 0,25 até 2,5% base seco das partículas.

A densidade é a variável mais importante a considerar na madeira, dela depende a boa qualidade da chapa. Para melhorar as propriedades das chapas, segundo Maloney (1977), o modo mais fácil é através do aumento do peso específico da chapa. Isto será conseguido através da variação da taxa de compactação (Geimer[3] apud Oliveira e Freitas, 1995).

O requisito básico da madeira de uma espécie para fabricação de aglomerado é ser de baixa densidade, para que a razão de compactação, que é a relação entre a densidade da chapa e densidade da madeira, seja no mínimo 1,3, para que ocorra a densificação necessária para a formação da chapa (Maloney, 1996; Iwakiri, 2003).

Contrariando isto, Nascimento (2003) apresentou estudo sobre a utilização de espécies do nordeste brasileiro na fabricação de madeira aglomerada, com o adesivo uréia-formaldeído. As espécies utilizadas foram o Angico, a Algaroba e a Jurema Preta, espécies de alta densidade. As chapas apresentaram densidade de 1,1 g/cm^3, aproximadamente. Foram requeridas para a prensagem uma temperatura de 120ºC e

[3] GEIMER, R.L. Dimensional stability of flakeboards as affected by board especific gravity and flake aligment. *Forest Products Journal*. 32(8): 44-52. 1982.

pressão de 2,5 MPa. Segundo Nascimento (2003) é possível obter chapas de boa qualidade com espécies de densidades mais altas.

2.3.2.3. Etapas de produção da madeira aglomerada

Segundo Maloney (1996), o processo de produção de chapas de partículas, envolve as etapas apresentadas a seguir.

a) Obtenção das partículas

A operação de geração de partículas é a fase do processo que define elementos dimensionais das partículas (comprimento, largura e espessura).

As propriedades de aglomerados dependem basicamente do tipo de partículas usadas. Sua preparação, desde a picagem, secagem, classificação e resinagem são os fatores mais importantes na produção de aglomerado (Kollmann et al., 1975 e Olmos, 1992).

b) Secagem das partículas

A secagem das partículas de madeira é uma fase muito importante na fabricação de aglomerado. De acordo com Olmos (1992), o contínuo aumento em exigência na qualidade de aglomerados é uma das razões para manter o controle sobre o teor de umidade final das partículas.

Segundo Youngquist (1999) a classificação das partículas é feita após a secagem. Para aglomerados, vários tipos de peneiras e classificadores pneumáticos podem ser usados para a peneiração das partículas de diferentes tamanhos.

c) Aplicação do adesivo

A próxima etapa é a resinagem das partículas, que consiste na aplicação da resina. Youngquist (1999) afirma que para chapas produzidas com uréia-formaldeído a porcentagem de resina varia entre 6 e 9%, de acordo com a massa da madeira. Segundo Maloney (1996) deve haver homogeneidade de distribuição do adesivo nas partículas para assegurar propriedades uniformes sobre toda a extensão da chapa.

d) Formação do colchão

Esta etapa é extremamente importante, pois uma chapa mal formada apresentará grande variação nas suas propriedades devido à diferença de densidade em sua extensão. Segundo Olmos (1992), as partículas são movimentadas por meio de rolos, esteiras, ar e combinação destas para então depositar as mesmas sobre uma placa metálica, lâmina plástica ou correia de tecido.

A quantidade de material do colchão e sua altura são pré-determinadas em função da densidade da chapa, da densidade da madeira empregada e pela espessura da chapa a ser obtida.

e) Prensagem

Antes da prensagem é feita uma pré-prensagem no colchão com o objetivo de reduzir sua altura e melhorar a sua consistência. Em seguida, os colchões são cortados em tamanhos previamente definidos e então são prensados. A temperatura de prensagem varia de 140^0C a 180^0C, dependendo da resina utilizada, e a pressão nos pratos para a obtenção de chapas de densidade média situa-se na faixa de 1,2 a 4,0MPa (Forest Products Laboratory - FPL, 1974).

Na indústria de chapas de partículas é muito importante considerar o conjunto de condições sob o qual as partículas são prensadas e consolidadas, tais como: temperatura, pressão e tempo de prensagem. Esta fase do processo é conhecida como ciclo de prensa, onde ocorre a consolidação do material e na qual são definidas, em grande parte, as propriedades finais do produto (FPL, 1974; Moslemi, 1974; Olmos, 1992).

Oliveira e Freitas (1995) afirmam que o tempo de prensagem pode variar de 4 a 8 minutos, dependendo da espessura da chapa, da umidade do colchão e da temperatura de prensagem. Quanto maior for qualquer uma destas variáveis, maior será o tempo de prensagem.

f) Acabamento

As chapas são resfriadas e acondicionadas logo após a saída da prensa ou empilhadas ainda quentes para permitir a continuação do processo de cura da resina iniciado durante a prensagem a quente. Segundo Tadashi (1988), as chapas são esquadrejadas e o material de borda (resíduo) é retirado e reciclado.

O lixamento efetuado em chapas já esquadrejadas tem por finalidade remover qualquer material solto da superfície bem como eliminar quaisquer riscos e irregularidades causados à superfície pelos pratos da prensa. Após o lixamento, as chapas são classificadas, pré-cortadas nas dimensões convencionais e armazenadas adequadamente.

2.4. O potencial de *Eucalyptus* e *Pinus* para manufatura de painéis

O setor industrial de base florestal tem sido marcado por um processo de utilização crescente de madeiras provenientes de reflorestamento, colocando o Brasil em sintonia com a ordem mundial, que enfatiza a preservação das florestas naturais e incentiva a implantação de florestas renováveis (Revista da madeira, 2001). O pinus e o eucalipto são alternativas como matéria-prima de qualidade para os diversos usos industriais.

Segundo Rech (2002), o *Eucalyptus* é uma espécie de múltiplos usos e um forte substituto para madeiras de espécies tropicais. Estudos têm sido conduzidos no sentido de melhoramento da espécie, o que resultará em ganho de qualidade do produto final.

O uso da madeira de Eucalipto ainda está restrito a poucas áreas da indústria madeireira e moveleira. Os motivos mais relevantes que impedem a utilização do *Eucalyptus* são a existência de certas características indesejáveis, sendo as mais importantes a ocorrência de colapso durante a secagem e a presença das tensões de crescimento (Interamnense, 1998). FAO (1981) apresenta também como características indesejáveis, os empenamentos, torções, contrações ocasionadas pela secagem e fibras reversas.

O gênero *Eucalyptus* pode ser considerado como um dos de maior possibilidade para produzir produtos alternativos em substituição de espécies nativas. FAO (1981) e Higa (2002) afirmam que sua madeira pode ser utilizada para diferentes finalidades, entre elas, na fabricação de painéis.

A produção de compensados no Brasil utiliza em torno de 70% madeiras oriundas de florestas nativas e 30% de florestas plantadas de *Pinus* spp (Zugman, 1998). Porém, tem havido uma redução dos estoques das florestas de Pinus spp e a enorme variabilidade das características das espécies florestais nativas dificultam a utilização destas como matérias-primas (Nock, 1978; Tomaselli, 1998).

Jankowsky (1979), avaliou as madeiras de *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* para a produção de lâminas e painéis compensados. No decorrer do estudo, somente foi possível a manufatura de compensados com lâminas de *Eucalyptus grandis*, uma vez que as lâminas obtidas das demais espécies mostraram qualidade inadequada.

Em prosseguimento aos estudos, Jankowsky (1983) testou seis espécies de eucaliptos: *E. pilularis*, *E. triantha*, *E. microcorys*, *E. pellita*, *E. saligna* e *E. grandis*, na manufatura de painéis compensados. De apenas duas espécies (*E. triantha* e *E. saligna*) foram obtidos lâminas de qualidade razoável. Os compensados produzidos com essas duas espécies apresentaram valores semelhantes de resistência à flexão estática. O autor concluiu que o *E. triantha* e o *E. salygna* são espécies aptas para a utilização na manufatura de compensados.

Pio (1996) avaliou a madeira do *Eucalyptus scabra* (Dum-Cours) e do *Eucalyptus robusta* (Smith) como fonte de matéria prima para laminação e produção de compensados. O autor concluiu que as espécies estudadas possuem boas características e alto potencial para produção de painéis compensados e indica a necessidade de estudos direcionados ao aumento da qualidade de colagem.

Almeida (2002) produziu lâminas e compensados uréicos com madeira do híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e considerou o híbrido de alto potencial para estes fins.

Bortoletto Jr. (2003), estudou e produziu compensados fenólicos a partir de onze espécies do gênero *Eucalyptus*. As espécies estudadas foram: *E. pilularis, E. propinqua*, *E. microcorys*, *E. maculata*, *E. pyrocarpa*, *E. tereticornis*, *E. urophyla*, *E. pellita*, *E. citriodora*, *E. torelliana* e *E. saligna*. Segundo o autor houve diferença significativa entre os valores médios das propriedades físicas e mecânicas dos compensados, de modo que estes 11 compensados não constituem um único grupo. Todos os compensados produzidos podem ser destinados ao uso exterior, com exceção para o compensado de *E. citriodora* que se restringe ao uso intermediário.

As madeiras mais utilizadas na produção de chapas de partículas são as espécies de coníferas, devido à baixa densidade. Em menor escala, são usadas folhosas de média densidade e, geralmente, em mistura com espécie de baixa densidade. No Brasil, a

madeira de *Pinus* é a mais utilizada, devido a sua disponibilidade, espécie como o *Eucalyptus*, é utilizada como parte da mistura (Iwakiri, 1998).

2.5. Mercado de painéis de madeira

A situação de mercado para o compensado e o aglomerado é bastante promissora. No ano 2002, a produção brasileira foi recorde, com 6.283 milhões de m^3. A Figura 4 apresenta a evolução da produção de painéis de madeira nos anos de 1994 a 2002.

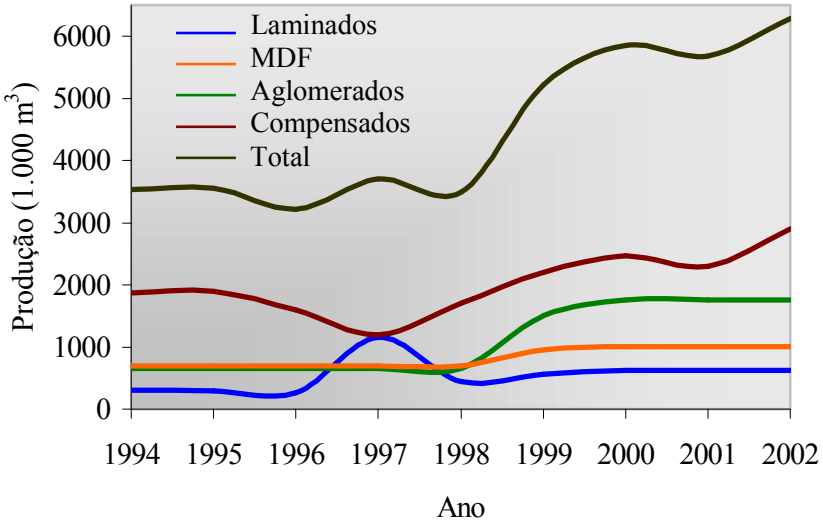


Figura 4 - Evolução dos últimos anos na produção brasileira de painéis de madeira.
Fonte: FAO (2004).

Segundo FAO (2005), a produção mundial de compensados em 2000 foi de 58.208 milhões de m^3 e em 2001, 54.580 milhões de m^3, que corresponde uma diminuição de 6,23% na produção. Porém, no período 2001/2003, houve um aumento de 20%, 54.580 para 68.401 milhões de m^3.

O compensado durante muitos anos foi o painel de madeira mais importante produzido e consumido no Brasil. Quanto à matéria-prima utilizada, segundo ABIMCI (2004), 40%

do compensado nacional é produzido com madeira tropical, os outros 60% utilizam madeiras de florestas plantadas, particularmente o *Pinus*.

No Brasil, a produção de compensado, no período 1996/2002, aumentou consideravelmente, 44% nestes cinco anos. Este aumento continuou no período de 2001/2003, segundo FAO (2005), foi na ordem de 20,7%. Em 2001 foram produzidos 2.300 milhões de m^3 e em 2003, 2.900 milhões de m^3.

A produção mundial de aglomerados alcançou 84 milhões de m^3, em 2000, destacando como o maior fabricante os Estados Unidos responsável por 25% desse volume. O Brasil posiciona-se em nono lugar, com 2% do volume produzido (Fortes, 2005).

Segundo FAO (2005), a produção mundial de aglomerados, caiu de 84.818 milhões de m^3 em 2000 para 83.111 milhões de m^3 em 2001. Porém, no período 2001/2003, subiu de 83.111 milhões de m^3 para 89.784 milhões de m^3, o que representa um aumento de aproximadamente 7,4%.

A Europa é a principal região exportador, enquanto América do Norte e Ásia/Oceania são importadoras. Os Estados Unidos são o maior importador mundial e o Canadá é o maior exportador. A China é outro importador de expressão.

Segundo Fortes (2005) a produção brasileira de aglomerado, no período 1996/2000, evoluiu de 1.059 mil m^3 para 1.762 mil m^3, o que representa um crescimento médio anual de 13,6%, superior à taxa mundial de 6,5%. No período de 2000/2003, segundo FAO (2005), o Brasil manteve a produção de aglomerados em 1.762 mil m^3.

2.6. Considerações sobre a revisão bibliográfica

Os produtos compostos à base de madeira têm sua aplicação difundida em todo o mundo, em vários setores, principalmente, o da construção civil e da indústria

moveleira. O grande potencial brasileiro, como fonte de riquezas naturais, para promover inovações nestes produtos, é conhecido. Apesar disto, muito ainda se tem a desenvolver de pesquisas no Brasil para colocar estes produtos em lugar de destaque no mundo.

Para os compensados e aglomerados, produtos produzidos a partir de madeira e adesivos, estudos têm sido direcionados ao conhecimento de espécies com potencial para substituição das tradicionais. Neste contexto, as espécies de reflorestamento, *Pinus* e *Eucalyptus*, são investigadas como fontes alternativas de madeira.

As tecnologias relativas aos processos e etapas de produção de painéis compensados e aglomerados já estão sedimentadas no país, seguindo uma tendência mundial. Porém, observa-se uma carência de estudos direcionados ao potencial de adesivos alternativos para a produção de painéis compensados e aglomerados.

Cabe ressaltar a inexistência de informações a respeito do desempenho de chapas de compensado e de aglomerado, produzidas com a resina poliuretana à base de mamona, em associação com lâminas ou cavacos de madeira, das espécies de reflorestamento dos gêneros *Pinus e Eucalyptus*.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais descritos nos itens subseqüentes foram utilizados na produção dos compensados e aglomerados.

3.1. Materiais

3.1.1. Espécies de madeira

Nos compensados foram utilizadas, lâminas da espécie *Eucalyptus saligna,* com 2mm de espessura nominal. Estas lâminas foram fornecidas pelo Laboratório de Laminação de Madeiras, da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", da Universidade de São Paulo. As lâminas foram fornecidas após processada a secagem ao ar livre.

A utilização desta espécie foi estimulada com base nas atuais tendências do mercado de produtos florestais. Como apresentado no item 2 - Revisão bibliográfica, muitos estudos indicam a possibilidade de substituição das espécies tradicionalmente utilizadas, pela madeira de *Eucalyptus* spp, para as mais diversas finalidades.

Para os aglomerados foram utilizadas partículas de madeira fornecidas pela empresa Eucatex Aglomerados, da cidade de Botucatu, São Paulo. Esta empresa adota a mistura de duas espécies na formação das partículas, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição das partículas de madeira.

Espécies de madeira	**(%)**
Eucalyptus grandis	47
Eucalyptus urophilla	5
Toras de *Pinus elliottii* var. *elliottii*	48

Fonte: Eucatex Aglomerados (2002).

Conforme informações do fornecedor, as partículas para as camadas externas são mais finas, com comprimento compreendido entre 4mm e espessura nominal de 15mm. Para a camada interna (miolo) utilizam-se partículas mais grossas, com comprimento variando de 6 a 42 mm e espessura de 15mm a 40mm.

Esta matéria-prima foi adotada na manufatura dos aglomerados, para fornecer parâmetros de comparação de propriedades de resistência e rigidez com chapas comerciais.

Na Tabela 2 são apresentados os valores médios da densidade aparente para as espécies utilizadas.

Tabela 2 - Valores médios da densidade aparente para as espécies utilizadas.

Espécie	**Densidade aparente (g/cm^3)**
Eucalyptus saligna*	0,73
Eucalyptus grandis**	0,64
Eucalyptus urophilla**	0,74
Pinus elliottii var. *elliottii***	0,56

Fonte: ABNT 7190 (1997).

3.1.2. Resina

A resina utilizada, a poliuretana derivada do óleo de mamona, é do tipo bicomponente, com teor de sólido de 100%, gel time de aproximadamente 25 minutos. Esta resina, I201 (impermeabilizante que utiliza 2 partes de poliól e 1 parte de isocianato aromático, pré-polímero), foi fornecida pela KEHL Indústria Química de São Carlos - SP. É uma resina de cura a frio, que pode ser acelerada com temperatura até 90ºC.

A viscosidade da resina foi verificada com um aparelho Copo Ford 8. O tempo médio de escoamento da resina variou de 40 a 50 segundos. Este tempo médio de escoamento é recomendado pela Alba Química (2002) para resinas tradicionais (uréicas e fenólicas) utilizadas na colagem de madeiras.

3.1.3. Emulsão de parafina

A emulsão de parafina adicionada nas chapas de aglomerados foi a S636, fornecida pela Solven Solventes e Químicos Ltda, situada em Hortolândia - SP. Esta emulsão, conforme prescrição do representante, apresenta 36% de teor de sólidos, viscosidade compreendida entre 8 - 30 s, medida no copo Ford 4 à temperatura de 30ºC e densidade entre 300 - 800 g/cm^3. Esta emulsão foi desenvolvida para aplicação em painéis de madeira reconstituída.

3.2. Estudo preliminar - primeira fase

Inicialmente, com o objetivo de definir os fatores a analisar e a metodologia a adotar, foram confeccionados painéis de compensados e aglomerados em condições distintas de prensagem e colagem.

Foram manufaturados oito painéis de compensado com a resina poliuretana à base de mamona: quatro prensados com temperatura, de cura da resina, ambiente

(aproximadamente 25ºC), tempo de prensagem de 10 minutos e quatro prensados com temperatura de cura de 60ºC e tempo de prensagem de 400 minutos. A pressão adotada foi de 1,2 MPa.

Os aglomerados foram produzidos com temperatura de 60ºC, tempo de prensagem de 10 minutos e pressão específica de 4,0 MPa. Os aglomerados apresentaram espessuras variadas, quatro com espessura nominal 10,5 mm e 4 com espessura nominal 12,5 mm. Não foi adicionada parafina na composição do painel.

3. 3. Manufatura dos compensados

As lâminas para a manufatura dos compensados apresentavam as dimensões nominais iniciais de 1000mm x 1000mm e foram reduzidas para 600mm x 600mm, correspondentes à dimensão final para cada painel, definido pelo tamanho do prato da prensa.

3.3.1. Classificação e secagem das lâminas

Após o corte nas dimensões estabelecidas, procedeu-se a classificação das lâminas segundo a Norma Brasileira NBR 9531 (1986). Esta norma estabelece critérios de classificação da maior para a menor qualidade, sendo as lâminas enquadradas nas classes N, A, B, C e D. As lâminas eram lisas, rachaduras devidos à secagem com variação de tamanho e com nós. As lâminas foram classificadas como lâminas C.

As lâminas foram empilhadas umas sobre as outras para permitir a equalização do teor de umidade entre elas e uma possível redução das ondulações surgidas durante a secagem ao ar livre. Na próxima etapa, as lâminas foram secas até a umidade de 3 a 4%. Esta umidade foi obtida pela colocação das lâminas dentro da prensa utilizada posteriormente na prensagem a quente, a uma temperatura de 120ºC por 10 minutos à pressão de 0,35 MPa.

Com as lâminas classificadas e secas, foram manufaturados compensados de sete camadas.

3.3.2. Processo de colagem

A resina poliuretana à base de mamona foi aplicada manualmente com o uso de um pincel, mantendo a uniformidade da distribuição da resina na superfície da lâmina. Adotou-se aplicar a resina em linha simples, com as lâminas recebendo a camada de cola em uma das superfícies.

Foram utilizadas duas diferentes gramaturas, 180 g/m^2 e 200g/m^2, na aplicação da resina. Após a aplicação, as chapas foram colocadas ortogonalmente umas sobre as outras, conforme apresentado na Figura 5.

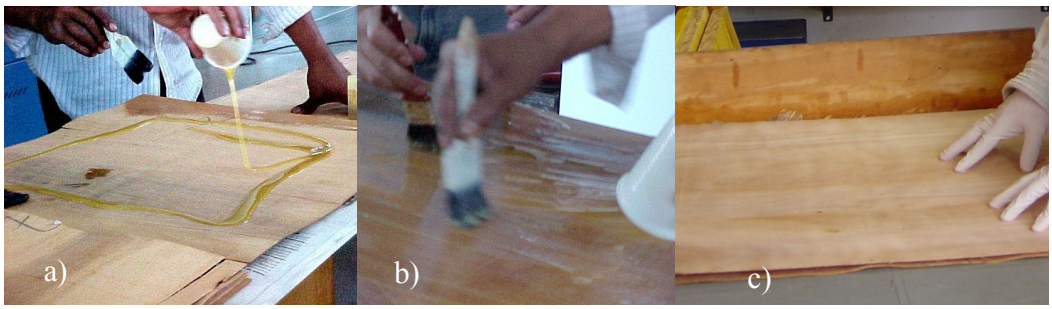


Figura 5 - Montagem dos compensados: a) aplicação da resina; b) espalhamento da resina e c) sobreposição ortogonal das lâminas.

3.3.3. Condições de prensagem dos compensados

Após a aplicação da resina, as lâminas sobrepostas foram pré-prensadas por um período de 10 minutos com a aplicação de pesos, com o objetivo de distribuir uniformemente a resina, entre as linhas de cola. Este tempo foi determinado em função do gel time da resina ser curto, 25 minutos aproximadamente.

O tempo de montagem ou assemblagem, decorrido entre a aplicação da resina e o momento em que a prensa é fechada, foi de 12 minutos. Porém, o tempo entre o início da aplicação da resina e o fechamento da prensa foi de 20 minutos.

Os compensados foram produzidos em uma prensa hidráulica Marconi MA - 098/50, dotada de quatro sistemas de aquecimento controlados eletronicamente com precisão de ±1,0ºC.

Foram prensados compensados em duas temperaturas, 60ºC e 90ºC, definidas em função da temperatura necessária para processar a cura da resina. Segundo Iwakiri (1998), na fabricação de compensados utilizando madeiras de densidade média a alta, deve-se aplicar pressão na faixa de 1,0 a 2,0 MPa. Adotou-se para este estudo a pressão de 1,2MPa. Este valor já foi adotado por Santana et. Al. (1979) para prensagem de compensados com resina alternativa à base de tanino-formaldeído.

Quanto ao tempo de prensagem, vários autores apresentaram diferentes tempos de prensagem em compensados fenólicos, entre eles, Santana et. al. (1979) apresenta estudos utilizando o tempo de 7 minutos em compensados prensados a 140 e 150ºC. Já Bortoletto Jr. (2003), adotou 10 minutos para a prensagem de compensados de *Eucalyptus* com resina fenólica, prensados a 145ºC. Como este tempo, deve ser suficiente para que a linha de cola mais interna atinja a temperatura de cura da resina, adotou-se 12 minutos para as duas temperaturas aplicadas. A etapa de prensagem dos compensados é apresentada na Figura 6.

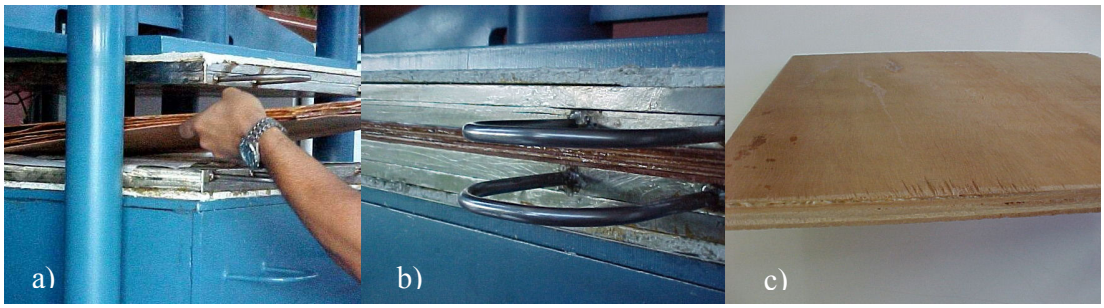


Figura 6 - Prensagem dos compensados: a) colocação das lâminas na prensa; b) prensagem e c) compensado pronto.

3.3.4. Ensaios físicos e mecânicos dos compensados

Após a prensagem, cada painel foi colocado na posição vertical e mantido nesta condição por, no mínimo, trinta dias. Este período é necessário para os painéis alcançarem a estabilização da temperatura com a do ambiente, a complementação da cura da resina e a equalização da umidade entre as faces e o miolo do painel.

Os compensados, com dimensões nominais de 600mm x 600mm x 14mm, foram esquadrejados para as dimensões 500mm x 500mm x 14mm. A operação de esquadrejamento evita o efeito da borda sobre os corpos-de-prova, que foram retirados posteriormente, com uma serra circular.

Foram produzidas dezesseis chapas de compensado, sendo utilizados dois processos de colagem (gramaturas) e temperatura. A composição dos tratamentos e repetições está detalhada no item - 3.6. Delineamento experimental e análise estatística.

O número de corpos-de-prova retirados por chapa e as normas adotadas, para cada ensaio específico, são apresentados na Tabela 3. As dimensões dos corpos-de-prova e a condução dos ensaios foram baseadas nas prescrições das normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, exceto para o ensaio de cisalhamento, que foi realizado de acordo com as prescrições da norma European Standard. Para a condução

dos ensaios utilizou-se a máquina universal de ensaio DARTEC M1000/RC, com capacidade 100KN.

Tabela 3 - Tipo de ensaio e número de corpos-de-prova por chapa de compensado.

Ensaios		Corpos-de-prova	Norma
Teor de umidade		5	NBR 9484 (1986)
Massa específica aparente		5	NBR 9485 (1986)
Absorção de água		5	NBR 9486 (1986)
Inchamento e recuperação da espessura		6	NBR 9535 (1986)
Flexão estática	Perpendicular à grã	4	NBR 9533 (1986)
	Paralela à grã	4	
Cisalhamento	Seco	5	EN 314-2 (1993)
	Úmido	5	
	Fervura	5	

3.4. Manufatura dos aglomerados

A metodologia utilizada para a manufatura dos painéis aglomerados é apresentada a seguir.

3.4.1. Secagem das partículas

As partículas foram fornecidas secas ao ar. Para a manufatura das chapas de aglomerado procedeu-se à secagem das partículas em estufa, com circulação e renovação de ar Marconi – MA 035 até atingir o teor de umidade de 6%. Este valor é apresentado por Andrade (2002) para manufatura de aglomerados com resina uréia-formaldeído.

3.4.2. Processo de formação do colchão

Após a secagem das partículas, procedeu-se a adição da resina, a poliuretana à base de mamona. Para efeito de comparação, foram utilizados dois diferentes processos na

formação do colchão, com e sem adição de parafina. Não foi adicionado solvente (água) e catalisador pois a resina utilizada não os requer.

A quantidade de materiais utilizados para a manufatura dos aglomerados é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 - Quantidade de materiais para a manufatura dos aglomerados.

Aglomerados	Matérias-primas	Quantidade
Com parafina	Partículas	1660 g
	Resina	10% do peso das partículas
	Parafina	1,5% do peso das partículas
Sem parafina	Partículas	1660 g
	Resina	10% do peso das partículas

Foram produzidos aglomerados em três camadas. Em cada face foram utilizados 25% de partículas finas e o restante (50%) foi constituído de partículas grossas no miolo (ver Figura 7). A aplicação da resina sobre as partículas foi realizada separadamente, para partículas do miolo e das superfícies. As partículas de cada camada foram colocadas em um vasilhame e a resina foi adicionada e pré-misturada manualmente. Em seguida, para garantir a homogeneidade de distribuição da resina nas partículas, foi utilizada uma batedeira planetária Lieme BP-12SL 6 Veld.

Figura 7 - Representação da formação do colchão de partículas para chapa de aglomerado de três camadas. Fonte: Iwakiri (2003).

As partículas foram distribuídas uniformemente em uma forma de 500mm x 500mm. Para a formação do colchão colocou-se a parte correspondente a uma das faces, em seguida, a camada miolo e, finalmente, a outra camada externa. O colchão foi formado

com aproximadamente 150mm de altura. A etapa de formação do colchão de partículas pode ser visualizada na Figura 8.

Figura 8 - Formação do colchão de partículas: a) adição das camadas; b) distribuição uniforme das camadas e c) colchão de partículas.

3.4.3. Condições de prensagem dos aglomerados

O colchão de partículas primeiramente foi pré-prensado para redução na altura e, na etapa seguinte, prensado definitivamente, com pressão de 4,0MPa. A prensa utilizada é a mesma da prensagem dos compensados. O tempo de fechamento da prensa foi de 2 minutos. As etapas de prensagem do colchão de partículas são apresentadas na Figura 9.

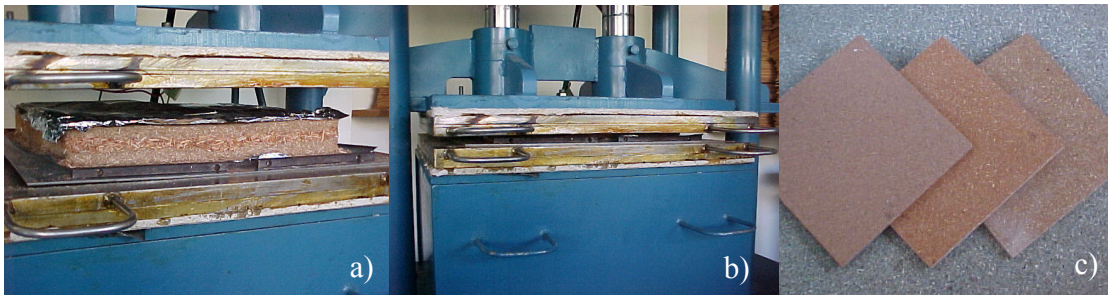


Figura 9 - Prensagem dos aglomerados: a) Início do processo de prensagem; b) prensagem do colchão e c) chapas prontas.

3.4.4. Ensaios físicos e mecânicos dos aglomerados

Após a prensagem, as chapas foram empilhadas para processar o resfriamento e completar a cura da resina. Uma vez resfriadas, as chapas foram esquadrejadas, lixadas e cortadas nas dimensões 450mm x 450mm x 14mm. Os corpos-de-prova foram cortados a partir de, no mínimo, 30 dias da fabricação.

Foram manufaturadas dezesseis chapas de aglomerado em processos distintos de prensagem. A composição dos tratamentos e repetições está detalhada no item 3.6 - Delineamento experimental e análise estatística.

As propriedades para as chapas de aglomerados foram obtidas segundo o documento normativo da NBR 14810 - 3 (2002). A NBR estabelece uma quantidade mínima de dez corpos-de-prova de cada propriedade por chapa comercial. Devido à limitação do tamanho do prato da prensa (escala de laboratório) esta quantidade foi reduzida.

Para a condução dos ensaios utilizou-se a máquina universal de ensaio Dartec M1000/RC, com capacidade 100KN. As propriedades físico-mecânicas dos aglomerados e a quantidade de corpos-de-prova para cada propriedade a analisar são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Tipo de ensaio e número de corpos-de-prova por chapa de aglomerado.

Propriedades		Número de corpos-de-prova
Densidade		5
Teor de umidade		5
Absorção de água total		6
Inchamento mais recuperação de espessura		6
Tração perpendicular		5
Flexão estática	Módulo de Ruptura	8
	Módulo de elasticidade	8

3.5. Compensados e aglomerados produzidos com resinas tradicionais para comparação de valores de propriedades físico-mecânicas

Para comparação das propriedades físico-mecânicas dos compensados e aglomerados produzidos com a resina poliuretana à base de mamona, foram produzidas quatro chapas de compensado com a resina fenol-formaldeído (Cascophen HL 2080), quatro compensados e quatro aglomerados com a resina uréia-formaldeído (Cascamite PL – 2040). Estas resinas têm suas aplicações sugeridas pelas indústrias de painéis.

A formulação das resinas foi orientada por Alba Química (2001) e Carvalho (2002) como apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 - Formulação dos ingredientes em partes por peso para cada resina.

Material	Partes
Resina fenol-formaldeído	100
Casca de coco em pó	5
Farinha de trigo	5
Água	10
Resina de uréia-formaldeído	100
Farinha de trigo	40
Água	40
Catalisador (sulfato de amônio)	2,5

Estas chapas foram produzidas segundo a mesma metodologia utilizada para a manufatura dos compensados e aglomerados com a resina poliuretana à base de mamona.

3.6. Análise por microscopia

A microscopia permite avaliar as interfaces dos materiais através de imagens, em escalas amplificadas, e assim conhecer a microestrutura de cada material e as superfícies de contato. Na microestrutura de cada material procura-se observar a homogeneidade com especial interesse na presença de vazios e incrustações.

Em colagem de madeiras é necessário observar as interfaces entre os materiais (madeira – adesivo) para avaliar a região de contato. A microscopia também é utilizada para avaliar as superfícies de fratura.

A microscopia óptica, por transmissão e reflexão, tem sido utilizada para avaliar as superfícies coladas de madeira. As técnicas de obtenção das imagens são pela microscopia óptica ou por varredura de feixe de elétrons.

Para este estudo adotou-se a microscopia óptica como análise nos compensados e aglomerados manufaturados com a resina poliuretana à base de mamona. Para os compensados, foi analisada a quantidade de falha na madeira e no adesivo na ruptura do corpo-de-prova, no ensaio seco da resistência da colagem ao esforço de cisalhamento. Nos aglomerados, foi avaliada a distribuição do adesivo na área superficial das partículas.

O microscópio utilizado foi o SZ1145 Olympus – GSWH10X F.N.22. As imagens foram fotografadas, por uma câmera OLY-200, acoplada ao microscópio.

3.7. Delineamento experimental e análises estatísticas

Com base nos resultados preliminares, apresentados no capítulo 4, item 4.1, foram definidos os delineamentos experimentais para os compensados e aglomerados. Na análise dos resultados dos painéis, foi considerado um delineamento inteiramente casualisado com arranjo fatorial 2 x 2.

Para os compensados, os fatores analisados foram a temperatura de prensagem e a gramatura de adesivo, Tabela 7.

Tabela 7 - Composição dos tratamentos para a análise dos resultados dos compensados.

Tratamentos	**Temperatura (ºC)**	**Gramatura (g/m^2)**	
1	60	200	**Pressão específica:** 1,2 MPa **Tempo de Prensagem:** 12 min.
2	90	200	
3	60	180	
4	90	180	

Para os aglomerados, os fatores analisados foram a temperatura e a parafina. Os tratamentos para os aglomerados são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Composição dos tratamentos para a análise dos resultados dos aglomerados.

Tratamentos	Temperatura (ºC)	Parafina	
1	60	com	**Pressão específica:** 4,0 MPa **Tempo de prensagem:** 10 min.
2	90	com	
3	60	sem	
4	90	sem	

Foram produzidas quatro repetições por tratamento num total de trinta e duas chapas, ou seja, dezesseis de compensados e dezesseis de aglomerados.

A normalidade dos resultados de todas as propriedades das chapas foi verificada por intermédio do teste Kolmogorov_Smirnov. Em seguida, foram realizadas análises de variância (Teste F) conduzidas ao nível de 5% de significância, tendo como fonte de variação os fatores e a interação entre eles para os valores de cada uma das propriedades. Onde observadas diferenças significativas entre as médias foram realizados testes de Tukey.

Nas análises estatísticas foi utilizado o software Minitab 13. A orientação para as análises foi obtida nos trabalhos de Costa Neto (1977) e Barros Neto et al. (2002).

4. RESULTADOS - PRIMEIRA FASE

4.1. Resultados para a madeira compensada

Os resultados obtidos para os compensados foram dispostos e discutidos a partir das tabelas e figuras apresentadas a seguir. Nas tabelas apresentadas, os números de 1 a 4 se referem às chapas prensadas à 60ºC, por 10 minutos, e os números 5 a 8, às chapas prensadas à temperatura ambiente (aproximadamente 25ºC) por 400 minutos. Os valores de CV correspondem ao coeficiente de variação, expresso em %. Foram incluídos, para discussão, os testes deTukey. As análises de variância são apresentadas no Anexo II.

Os valores médios da massa específica aparente (ρ) e do teor de umidade (U), dos compensados são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Valores médios de massa específica aparente e teor de umidade dos compensados.

Chapas	**ρ (g/cm^3)**	**U (%)**
1	0,81	9,0
2	0,77	9,2
3	0,80	8,9
4	0,79	9,0
5	0,81	8,9
6	0,80	8,9
7	0,76	9,0
8	0,81	8,9
Média	0,8	9,0
CV(%)	2,4	1,2

Na Tabela 10 são apresentados os valores médios da absorção total de água, inchamento e recuperação em espessura dos compensados.

Nas análises de variância (Anexo II – Figura 68 e 69), para a massa específica aparente e o teor de umidade não houve diferença significativa ao nível de 95% de probabilidade, para o fator temperatura de prensagem analisada.

Tabela 10 - Valores médios de absorção total de água, inchamento e recuperação de espessura para cada compensado.

Chapas	Absorção total (%)	Inchamento (%)	Recuperação (%)
1	28,18	8,19	2,66
2	29,90	8,13	2,69
3	28,65	7,62	2,63
4	29,05	8,92	2,59
5	22,10	8,09	2,48
6	23,16	8,05	2,40
7	22,41	8,05	2,39
8	23,32	9,23	2,39
Média	25,85	8,29	2,53
CV(%)	13,03	6,3	5,06

Na Tabela 10, os valores médios para a absorção total de água, inchamento e recuperação em espessura foram levemente superiores para os compensados prensados à temperatura de 60ºC (1 a 4). Nas análises de variância (Anexo II – Figura 70 a 72), houve diferenças significativas ao nível de 95% de probabilidade, para as variáveis absorção total de água e recuperação em espessura. O inchamento não apresentou diferença significativa entre as médias dos compensados prensados a diferentes temperaturas. Os testes de Tukey, para a absorção total e a recuperação em espessura, são apresentados nas Tabelas 11 e 12.

Tabela 11 - Teste de Tukey para os resultados de absorção total de água dos compensados, para o fator temperatura - primeira fase.

Fonte de variação: Temperatura (ºC)	Número de repetições	Absorção total média de água (%)	5%*
60	4	28,50	a
25	4	22,75	b

*Médias seguidas por letras distintas diferem entre si ao nível de significância indicado.

Tabela 12 - Teste de Tukey para os resultados de recuperação em espessura dos compensados para o fator temperatura - primeira fase.

Fonte de variação: Temperatura (ºC)	Número de repetições	Recuperação em espessura média (%)	5%*
60	4	64,50	a
25	4	57,75	b

*Médias seguidas por letras distintas diferem entre si ao nível de significância indicado.

Na Tabela 13, são apresentados os valores médios dos resultados das propriedades mecânicas, módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE) na flexão estática, considerando a direção paralela e perpendicular à grã das lâminas externas.

Tabela 13 - Valores médios do MOR e MOE na flexão estática para cada compensado.

Chapas	**Flexão estática**			
	Paralela		*Perpendicular*	
	MOR (MPa)	**MOE (MPa)**	**MOR (MPa)**	**MOE (MPa)**
1	93	11105	62	6159
2	92	11931	69	6438
3	94	11577	61	5887
4	95	12115	66	5830
5	81	9675	55	5384
6	83	11710	59	5782
7	83	11418	60	5123
8	87	10876	57	5876
Média	88,5	11300	61,13	5810
CV(%)	6,39	6,84	7,49	7,07

As análises de variância (Anexo II – Figura 73 e 74) apresentaram diferenças significativas ao nível de 95% de probabilidade, entre os valores médios do MOR

paralelo e MOR perpendicular dos compensados, das temperaturas de prensagem analisadas. Os testes de Tukey são apresentados na Tabela 14 e 15.

Tabela 14 - Teste de Tukey para os resultados de MOR paralelo para o fator temperatura dos compensados - primeira fase.

Fonte de variação: Temperatura (ºC)	Número de repetições	Módulo de ruptura paralelo médio (MPa)	5%*
60	4	93,5	a
25	4	83,5	b

*Médias seguidas por letras distintas diferem entre si ao nível de significância indicado.

Tabela 15 - Teste de Tukey para os resultados de MOR perpendicular para o fator temperatura dos compensados - primeira fase.

Fonte de variação: Temperatura (ºC)	Número de repetições	Módulo de ruptura perpendicular Médio (MPa)	5%*
60	4	64,50	a
25	4	57,75	b

*Médias seguidas por letras distintas diferem entre si ao nível de significância indicado.

Além da diferença entre as médias observadas nas Tabelas 14 e 15, os modos de ruptura apresentados pelos corpos-de-prova nos ensaios para ambas as chapas foram bem diferentes.

Nos corpos-de-prova das chapas 1 a 4 as rupturas foram por tração nas lâminas da face inferior ou por compressão na lâmina da face superior. Estas rupturas e o arranjo do ensaio são apresentados na Figura 10. Nas chapas 5 a 8, as rupturas ocorreram por cisalhamento na linha de cola e/ou por delaminação, o que caracteriza falha na adesão. Estas rupturas são apresentadas na Figura 11.

Nas análises de variância (Anexo II – Figura 75 e 76), para o MOE paralelo e o MOE perpendicular não houve diferença significativa ao nível de 95% de probabilidade, para o fator temperatura de prensagem analisada.

Figura 10 - Rupturas dos corpos-de-prova de flexão estática - compensado prensado a 60ºC.

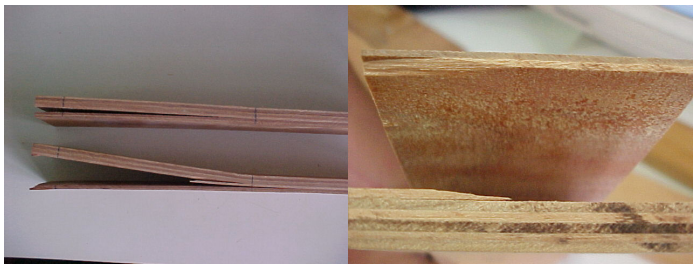


Figura 11 - Rupturas dos corpos-de-prova de flexão estática – compensado prensado à temperatura ambiente.

Os resultados dos ensaios da tensão de ruptura e de falha na madeira, obtidos no ensaio de resistência da colagem ao esforço de cisalhamento, realizados na condição seca, úmida e fervura são apresentados na Tabela 16. O termo “tensão de ruptura” é adotado no documento normativo NBR 9533 (1986).

Tabela 16 - Valores médios de tensão de ruptura e de falha na madeira, obtidos no ensaio de resistência da colagem ao esforço de cisalhamento para cada compensado.

	Resistência da colagem ao esforço de cisalhamento					
	Seco[a]		**Úmido[b]**		**Fervura[c]**	
Chapas	*Tensão de ruptura (MPa)*	*Falha na madeira (%)*	*Tensão de ruptura (MPa)*	*Falha na madeira (%)*	*Tensão de ruptura (MPa)*	*Falha na madeira (%)*
1	3,7	70	2,9	60	1,9	25
2	3,7	80	2,6	60	1,8	15
3	3,6	80	2,7	50	1,2	25
4	3,9	80	2,9	60	2,1	30
5	2,9	60	2,3	20	*	*
6	3,1	60	2,6	10	*	*
7	2,8	50	2,1	10	*	*
8	2,9	60	2,3	20	*	*
Média	3,3		2,5			
CV(%)	13,3		11,5			

*Valores não obtidos, os corpos-de-prova delaminaram na fervura. [a]Teores de umidade apresentados na Tabela 12. [b]Após imersão do corpo-de-prova em água por 24 horas. [C]Após imersão do Corpo-de-prova em água fervente por 4 horas e secos por vinte horas a 62ºC. Novamente submersos em água fervente por 4 horas, resfriados em água fria e ensaiados.

Nas análises de variância, Anexo II, Figuras 77 e 78, foram notadas diferenças significativas ao nível de probabilidade de 95% para a variável tensão de ruptura, nos ensaios de resistência da colagem ao cisalhamento seco e úmido. Os testes de Tukey para estas variáveis respostas são apresentados nas Tabelas 17 e 18.

Tabela 17 - Teste de Tukey para os resultados de tensão de ruptura, no ensaio seco, para o fator temperatura dos compensados - primeira fase.

Fonte de variação: Temperatura (ºC)	Número de repetições	Tensão de ruptura médio (MPa)	5%*
60	4	3,73	a
25	4	2,93	b

*Médias seguidas por letras distintas diferem entre si ao nível de significância indicado.

Tabela 18 - Teste de Tukey para os resultados de tensão de ruptura, no ensaio úmido, para o fator temperatura dos compensados - primeira fase.

Fonte de variação: Temperatura (ºC)	Número de repetições	Tensão de ruptura médio (MPa)	5%*
60	4	2,78	a
25	4	2,33	b

*Médias seguidas por letras distintas diferem entre si ao nível de significância indicado.

A avaliação da qualidade da linha de colagem permite classificar o compensado segundo o local de utilização. Os compensados destinados ao uso interior são avaliados no ensaio a seco, ao uso intermediário no ensaio úmido e ao uso exterior no ensaio pós-fervura, por meio dos valores das tensões de ruptura. O porcentual de falha na madeira, avaliado de forma subjetiva, complementa os resultados do ensaio de cisalhamento.

A Norma Brasileira NBR 9531 (1986) não especifica qualquer valor de referência para tensão de ruptura no ensaio de cisalhamento e exige um mínimo de porcentagem de falha na madeira de 60, 60 e 80% para classificar o compensado para uso interno, intermediário e externo, respectivamente. Almeida (2002) afirma que essa norma encontra-se em processo de revisão, com tendência a adotar os requisitos da norma européia European Standart - EN 314-2 (1993), apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 - Requisitos da Norma Européia para classificação de compensados.

Resistência da colagem ao esforço de cisalhamento	
Tensão de ruptura (MPa)	Falha na madeira (MPa)
$0,2 \leq f_v < 0,4$	≥ 80
$0,4 \leq f_v < 0,6$	≥ 60
$0,6 \leq f_v < 1,0$	≥ 40
$1,0 \leq f_v$	sem exigência

Fonte: EN 314-2 (1993).

A norma européia relaciona o valor médio da tensão de ruptura com o valor médio da porcentagem de falha na madeira. À medida que aumenta o valor da tensão de ruptura, a exigência em termos de falha na madeira diminui, sendo que, para valores iguais ou superiores a 1,0 MPa, não há mais exigência para percentagem de falha na madeira.

Na Tabela 16, observa-se que as únicas chapas que não atenderam aos valores de tensão de ruptura exigidos pela EN 314-2 (1993), foram os manufaturados com temperatura ambiente de prensagem (5 a 8), na condição de fervura. Com base nos requisitos da norma européia, pode-se dizer que os compensados manufaturados com a resina poliuretana à base de mamona, 1 a 4, podem ser indicados ao uso interior, intermediário e exterior. Os compensados 5 a 8 podem ser indicados ao uso interior e intermediário.

4.2. Resultados para a madeira aglomerada

Os resultados obtidos para os aglomerados são apresentados a seguir. Todas as chapas foram prensadas a 60ºC. Nas tabelas, os números de 1 a 4 se referem às chapas com espessura nominal de 10,5 mm, e os números 5 a 8, às chapas de espessura 12,5 mm. Os valores de C.V. correspondem ao coeficiente de variação, expresso em %.

Os valores médios das propriedades físicas, densidade (ρ), teor de umidade (U), dos aglomerados são apresentados na Tabela 20 e, na Tabela 21, os valores médios da absorção de água e inchamento.

Tabela 20 - Valores médios de densidade aparente e teor de umidade para cada aglomerado.

Chapas	**ρ (g/cm^3)**	**U (%)**
1	0,80	9,3
2	0,80	9,5
3	0,81	9,3
4	0,82	9,2
5	0,81	9,4
6	0,81	9,6
7	0,81	9,6
8	0,85	9,6
Média	0,81	9,44
CV(%)	1,9	1,69

Tabela 21 - Valores médios de absorção de água e inchamento para cada aglomerado.

Chapas	Absorção de água (%)		Inchamento (%)	
	2 horas	24 horas	2 horas	24 horas
1	8,79	18,68	5,08	11,86
2	6,67	15,56	4,19	13,49
3	9,20	20,69	4,10	14,97
4	8,97	25,64	5,21	16,41
5	9,09	20,45	3,99	15,29
6	7,37	17,89	5,56	13,48
7	8,89	18,89	3,70	14,80
8	9,30	20,93	4,55	17,08
Média	8,54	19,84	4,55	14,67
CV(%)	11,33	14,79	14,65	11,53

A NBR 14810 - 2 (2002) indica como 8% o valor máximo para o inchamento dos aglomerados após imersão em água por 2 horas, exigência atendida por todas as chapas. O documento normativo não apresenta valores para inchamento vinte e quatro horas e nem para absorção de água duas e vinte e quatro horas.

Na Tabela 22 são apresentados os valores médios dos resultados das propriedades mecânicas, módulos de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE) obtidos no ensaio de flexão estática.

Tabela 22 - Valores médios do MOR e MOE na flexão estática e tração perpendicular para cada aglomerado.

Chapas	**Flexão estática**	
	MOR (MPa)	**MOE (MPa)**
1	18,09	3096
2	16,44	2730
3	17,64	3212
4	19,02	2940
5	17,50	3125
6	18,70	3100
7	18,25	2965
8	17,35	3103
Média	17,87	3034
C.V. (%)	4,59	4,97

A NBR 14810 – 2 apresenta um valor mínimo de MOR na flexão estática de 16 MPa para chapas com espessuras compreendidas entre 14 e 20 mm de espessura. Todas as chapas atenderam a este requisito.

Na Tabela 23 tem-se os valores para a tração perpendicular dos aglomerados.

Tabela 23 - Valores médios da resistência à tração perpendicular para cada aglomerado.

Chapas	Tração perpendicular (MPa)
1	0,92
2	0,88
3	0,88
4	0,89
5	0,88
6	0,82
7	0,89
8	0,86
Média	0,88
C.V. (%)	3,27

Segundo a NBR 14810 – 2, as chapas de aglomerado com espessuras compreendidas entre 5 e 13 mm devem apresentar um valor mínimo de tração perpendicular de 0,40 MPa e, para espessuras entre 14 e 20, este valor é 0,35 MPa. Na tabela 23 é verificado que todas as chapas atenderam a este requisito. Porém, na execução deste ensaio, a maioria dos corpos-de-prova não rompeu na área central, como esperado para este tipo de ensaio, e sim, na linha de cola formada entre o corpo-de-prova e o bloco de tração. A cola utilizada foi a hot-melt (sugerida pela NBR 14810 - 2).

Na figura 12 são apresentados os tipos de ruptura ocorridos, na área central e na linha de cola dos corpos-de-prova.

Figura 12 - Corpos-de-prova rompidos no ensaio de resistência à tração perpendicular: a e b) ruptura na área central do corpo-de-prova e c) ruptura na linha de cola.

As análises de variância (Anexo II – Figura 79 a 88), para todas as médias dos valores das variáveis dos aglomerados (propriedades físico-mecânicas), não apresentaram diferenças significativas ao nível de 95% de probabilidade, para o fator espessura analisado.

4.3. Análise dos coeficientes de variação

Rocco Lahr (1990) e Sales (1996) desenvolveram pesquisas que demonstram que os valores dos coeficientes de variação para as propriedades da madeira são da ordem de 18%, para umidade de 12%. Foram obtidos baixos coeficientes de variação, menores que os admitidos para a madeira, para todas as chapas de compensado e aglomerado. Os documentos normativos brasileiros não estipulam valores para os coeficientes de variação da madeira compensada e aglomerada. Foram adotados, como referência, os apresentados para a madeira maciça.

4.4. Conclusões - primeira fase

Os compensados manufaturados com resina poliuretana à base de mamona, com temperatura de cura acelerada para 60ºC, apresentaram valores de MOR e MOE na flexão estática superiores aos obtidos para cura à temperatura ambiente.

Na execução dos ensaios de flexão estática, foi observada, nos corpos-de-prova das chapas prensadas à temperatura ambiente, a ocorrência de ruptura por cisalhamento na linha de cola e/ou por delaminação, o que caracteriza falha na adesão. Nos ensaios de resistência da colagem ao esforço de cisalhamento, as chapas prensadas à temperatura ambiente não atenderam aos valores de tensão de ruptura apresentados na EN 314-2 (1993), para uso exterior, analisado na condição de ensaio de fervura. Sendo assim, foi adotado trabalhar com as temperaturas de 60ºC e 90ºC, na prensagem, inclusive os aglomerados.

As chapas de aglomerado atenderam às exigências da NBR 14810 - 2 (2002) que estabelece como 8% o valor máximo para o inchamento dos aglomerados, após imersão em água por duas horas. Outro fator é que as chapas de aglomerados, nesta primeira fase dos estudos, com a resina poliuretana à base de mamona, foram manufaturadas sem a adição de parafina, produto indicado para melhorar as propriedades de absorção de água e inchamento. Sendo assim, na segunda fase dos estudos, será analisada a influência da parafina nas propriedades físico-mecânicas dos aglomerados produzidos com a resina poliuretana à base de mamona.

Devido à dificuldade de um controle rigoroso na prensagem, no estudo inicial, as chapas de aglomerado apresentaram pequenas diferenças na espessura. Com o objetivo de produzir aglomerados com características próximas aos industrializados, adotou-se para o prosseguimento da pesquisa, a espessura nominal de 15 mm para os aglomerados.

Os valores de MOR e MOE obtidos no ensaio de flexão estática não apresentaram variação significativa para todas as chapas de aglomerado. Os valores de MOR atenderam aos requisitos especificados pela NBR 14810 – 2.

Foram obtidos baixos coeficientes de variação para todos os resultados das propriedades físico-mecânicas das chapas. Isto é um bom indicativo da homogeneidade do produto fabricado e da boa condução na produção e nos ensaios.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO - SEGUNDA FASE

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos na segunda fase do trabalho. Os testes de normalidade Kolmogorov-Smirnov são apresentados no Anexo I (Figura 20 a 42). Em alguns casos foi efetuada a transformação dos dados. Foram incluídos, para discussão, os resultados dos testes de Tukey. Estes testes foram realizados para as propriedades, onde as análises de variância demonstraram diferenças estatisticamente significativas entre as médias. Todas as análises de variância (Teste F) são apresentadas no Anexo II.

5.1. Resultados obtidos para a madeira compensada

5.1.1. Massa específica aparente e teor de umidade

Na Tabela 24 são apresentados os valores médios da massa específica aparente e teor de umidade, para os compensados produzidos.

Tabela 24 - Valores médios da massa específica aparente e teor de umidade de cada compensado.

Chapas	Tratamento	Massa específica aparente (g/cm^3)	Teor de umidade (%)
1	1	0,75	10,56
2		0,76	10,53
3		0,78	10,32
4		0,77	10,70
5	2	0,78	10,43
6		0,77	10,30
7		0,75	10,23
8		0,77	10,66
9	3	0,77	10,63
10		0,77	10,51
11		0,78	10,56
12		0,77	10,78
13	4	0,77	10,77
14		0,76	10,29
15		0,78	10,65
16		0,78	10,59
Média		0,77	10,53
CV(%)		2,09	1,64

A densidade aparente média do *Eucalyptus saligna* é aproximadamente 0,73g/cm^3 (NBR 7190/1997), valor ligeiramente inferior aos obtidos para os compensados. Conforme descrito em Kollmann et al. (1975), na produção de derivados de madeira laminados, as lâminas superficiais sofrem uma densificação durante o processo de prensagem. Esta densificação gera um aumento da densidade final do painel que pode chegar a 5% em relação à matéria-prima que o originou, em processos de baixa pressão (0,6 a 2,0MPa).

Os valores das massas específicas aparentes para os compensados apresentaram, em média, 2,7% de acréscimo em relação à madeira original.

Nas análises de variância (Anexo II - Tabela 89 e 90), para a massa específica aparente e o teor de umidade, não foram encontradas diferenças significativas ao nível de 95% de probabilidade. Não houve interação significativa entre os fatores dos tratamentos.

5.1.2. Absorção total de água

A Tabela 25 apresenta os valores médios da absorção total obtidos para cada chapa de compensado.

Tabela 25 - Valores médios de absorção total de água para cada compensado.

Chapas	Tratamentos	Absorção de água total (%)
1	1	28,54
2		29,02
3		29,13
4		31,26
5	2	29,52
6		28,98
7		30,76
8		29,10
9	3	28,52
10		29,54
11		28,65
12		26,45
13	4	30,37
14		30,34
15		28,18
16		31,20
Média		29,35
CV(%)		4,23

A análise de variância para a absorção total (Anexo II - Tabela 91) indica que não houve diferença significativa entre os tratamentos para os fatores analisados (temperatura, gramatura e interação entre fatores).

Os valores médios de absorção de água total, apresentados na Tabela 25, são inferiores (5,5 a 14,8 %) aos valores apresentados por Bortoletto Jr. (2003), para compensados manufaturados com cinco lâminas de *Eucalyptus saligna* e adesivo fenólico (33,08 % de absorção de água total). Esse fato pode ser justificado pelo efeito da espessura do painel

(14mm neste estudo e 10mm para o fenólico), mas evidencia a eficiência da resina à base de mamona nas linhas de cola.

5.1.3. Inchamento e recuperação de espessura

Os valores de inchamento, inchamento mais recuperação em espessura e recuperação em espessura, obtidos para cada compensado, são apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 - Valores do inchamento, inchamento mais recuperação de espessura e recuperação de espessura para cada compensado.

Chapas	**Tratamentos**	**Inchamento mais recuperação (%)**	**Recuperação em espessura (%)**	**Inchamento (%)**
1	1	9,45	1,95	7,49
2		8,88	1,69	7,19
3		9,41	2,18	7,23
4		8,89	1,70	7,19
5	2	7,09	1,74	5,35
6		8,56	1,98	6,57
7		6,88	1,70	5,18
8		8,56	2,02	6,55
9	3	8,74	1,61	7,13
10		8,00	1,88	6,12
11		8,01	1,28	6,73
12		8,85	1,66	7,19
13	4	7,55	1,25	6,29
14		9,96	2,19	7,77
15		9,90	1,89	8,01
16		9,00	1,35	7,65
Média		8,61	1,76	6,85
CV(%)		10,55	16,37	11,85

As análises de variância, para as variáveis inchamento mais recuperação em espessura, recuperação em espessura e inchamento, apresentadas no Anexo II, Tabelas, 92 a 94, demonstram que não houve diferença significativa ao nível de 95% para a variável recuperação em espessura, entre os tratamentos e nem interação significativa entre os fatores. Para as variáveis inchamento mais recuperação em espessura e inchamento, foram observadas interações significativas entre os fatores analisados. Sendo assim, nas Tabelas 27 e 28 são apresentados os testes de Tukey para estas variáveis.

Tabela 27 - Teste de Tukey para os resultados de inchamento mais recuperação em espessura para a interação entre os fatores.

Fonte de variação: Interação entre temperatura e gramatura	Número de repetições	Média de Inchamento mais recuperação em espessura (%)	
60 ºC - 200 g/m^2	4	9,16	
90 ºC - 200 g/m^2	4	7,77	
60 ºC - 180 g/m^2	4	8,40	
90 ºC - 180 g/m^2	4	9,10	
Fator interação para 5%* de significância			
Tratamentos	1	2	3
2	a a		
3	a a	a a	
4	a a	a a	a a

* Médias seguidas por letras iguais não diferem entre si ao nível de significância indicado.

Os dados do teste de Tukey, Tabela 14, demonstram que as médias de todos os tratamentos não diferem entre si ao nível de 5% de significância.

Tabela 28 - Teste de Tukey para os resultados de inchamento da interação entre os fatores.

Fonte de variação: Interação entre temperatura e gramatura	Número de repetições	Média de inchamento (%)	
60 ºC - 200 g/m^2	4	1,49	
90 ºC - 200 g/m^2	4	1,44	
60 ºC - 180 g/m^2	4	1,47	
90 ºC - 180 g/m^2	4	1,50	
Fator interação para 5%* de significância			
Tratamentos	1	2	3
2	a		
	b		
3	a	a	
	a	a	
4	a	a	a
	a	b	a

* Médias seguidas por letras distintas diferem entre si ao nível de significância indicado.

O Teste de Tukey, Tabela 28, indica diferença significativa entre as médias dos tratamentos 1 e 2 e dos tratamentos 2 e 4. Os demais tratamentos não apresentaram diferença significativa dos valores médios dos resultados, para a interação entre fatores. O tratamento 2 apresentou valores médios inferiores aos dos outros tratamentos. É interessante destacar que, para a propriedade inchamento, um menor valor obtido corresponde à maior estabilidade dimensional do compensado.

A Tabela 29 apresenta valores médios de inchamento mais recuperação em espessura e de recuperação em espessura, para compensados de espécies de *Eucalyptus* encontradas na literatura.

Tabela 29 - Valores médios de inchamento e recuperação de espessura para alguns compensados encontrados na literatura.

Fonte	Espécie	Inchamento (%)	Recuperação (%)
Keinert Jr & Interamnense (1994)	*E.robusta*[1]	7,92	3,28
Pio (1996)	*E. robusta*[1]	11,04	3,56
		11,30	2,09
	E. scabra[2]	9,63	3,26
		11,47	2,60
Interamnense (1998)	*E. cloeziana*[1]	8,04	1,89
	E. maculata[1]	8,19	2,64
	E. cloeziana[2]	11,14	2,79
	E. maculata[2]	11,43	4,22
Almeida (2002)	*E. grandis x E. urophylla*[1]	8,5	1,6

[1]chapas de 10mm produzidas com uréia, [2]chapas de 10mm produzidas com fenol

Na Tabela 26, os valores médios para recuperação em espessura são de 1,76% e para inchamento mais recuperação em espessura, 8,61%. Estes valores estão próximos aos apresentados por Almeida (2002) e inferiores aos apresentados pelos outros autores. Segundo Almeida (2002), valores percentuais baixos de inchamento mais recuperação em espessura e inchamento indicam boa estabilidade dimensional do compensado.

5.1.4. Resistência da colagem ao esforço de cisalhamento e falha na madeira

Os valores da tensão de ruptura e falha na madeira são apresentados na Tabela 30.

Tabela 30 - Valores médios da tensão de ruptura e de falha na madeira para cada compensado.

Chapas	Tratamentos	Resistência da colagem ao esforço de cisalhamento					
		Seco		Úmido[a]		Fervura[b]	
		Tensão de ruptura (MPa)	*Falha na madeira (%)*	*Tensão de ruptura (MPa)*	*Falha na madeira (%)*	*Tensão de ruptura (MPa)*	*Falha na madeira (%)*
1	1	3,83	70	3,05	50	1,94	20
2		3,77	80	2,57	30	1,93	10
3		3,66	70	2,66	40	1,59	10
4		3,79	80	2,84	40	2,05	10
5	2	3,47	70	2,72	30	*	*
6		3,16	40	1,91	20	*	*
7		3,17	40	1,88	10	*	*
8		3,55	70	2,58	40	*	*
9	3	3,72	60	2,87	40	1,59	10
10		2,53	40	1,99	10	*	*
11		3,89	60	3,03	30	1,44	10
12		3,76	50	2,87	30	1,55	10
13	4	3,55	40	2,72	20	*	*
14		2,84	60	1,89	20	*	*
15		3,22	40	2,97	20	*	*
16		2,90	60	2,04	40	*	*
Média		3,43		2,54		1,72	
CV(%)		11,94		17,29		13,82	

*Os corpos-de-prova (CP) delaminaram na fervura. [a]Após imersão do corpo-de-prova em água por 24 horas. [b]Após imersão do CP em água fervente por 4 horas e secos por vinte horas a 62ºC. Novamente submersos em água fervente por 4 horas, resfriado em água fria e ensaiados.

Nas análises de variância, Anexo II - Tabela 95 e 96, foram encontradas diferenças significativas entre os tratamentos, ao nível de 95% probabilidade, para os fatores temperatura e gramatura nos valores do cisalhamento seco e fator temperatura nos valores do cisalhamento úmido. Estas análises indicam, para os valores dos

cisalhamentos seco e úmido, a não interação entre os fatores de tratamento. Nas Tabelas 31 a 33 são apresentados os testes de Tukey para estes fatores.

Tabela 31 - Teste de Tukey para os resultados de cisalhamento seco para o fator temperatura.

Fonte de variação: Temperatura (ºC)	Número de repetições	Tensão de ruptura Média (MPa)	5%*
60	40	3,62	a
90	40	3,24	b

*Médias seguidas por letras distintas diferem entre si ao nível de significância indicado.

Tabela 32 - Teste de Tukey para os resultados de cisalhamento seco para o fator gramatura.

Fonte de variação: Gramatura (g/m^2)	Número de repetições	Tensão de ruptura Média (MPa)	5%*
200	40	3,55	a
180	40	3,30	b

*Médias seguidas por letras distintas diferem entre si ao nível de significância indicado.

Tabela 33 - Teste de Tukey para os resultados de cisalhamento úmido para o fator temperatura.

Fonte de variação: Temperatura (ºC)	Número de repetições	Tensão de ruptura Média (MPa)	5%*
60	40	2,79	a
90	40	2,34	b

*Médias seguidas por letras distintas diferem entre si ao nível de significância indicado.

No teste de Tukey, Tabelas 31 e 32, é observado que a média dos valores de tensão de ruptura dos compensados no ensaio de cisalhamento seco, do tratamento 1 (60ºC e 200 g/m^2) foram superiores as médias dos valores dos demais tratamentos. Na Tabela 30,

observa-se maior falha na madeira para o tratamento 1, tanto no ensaio seco como úmido, indicativo de bom desempenho da resina.

Na Tabela 33, os valores médios obtidos no ensaio de cisalhamento úmido, para a temperatura de 60ºC, foram superiores aos valores para a temperatura de 90ºC.

A norma européia European Standart - EN 314-2 (1993) apresenta os requisitos para classificação de compensados, conforme consta no capítulo 3, Tabela 19. Esta tabela apresenta a relação do valor médio da tensão de ruptura com o valor médio da porcentagem de falha na madeira. Para valores iguais ou superiores a 1,0 MPa não há exigência para percentagem de falha na madeira.

Na Tabela 30, os dados demonstram que todas as chapas atenderam ao valor de tensão de ruptura estipulado pela EN 314-2 (1993), no ensaio de cisalhamento seco e úmido. Porém, no ensaio de fervura, as chapas prensadas a 90ºC e a chapa 10, prensada a 60ºC, delaminaram, não podendo ser ensaiadas. Para o caso específico da chapa 10, ficou evidenciada uma falha na colagem, todos os corpos-de-prova de cisalhamento desta chapa soltaram na mesma lâmina quando em fervura. Nos demais ensaios, cisalhamento seco e úmido, esta chapa apresentou valores mais baixos de tensão de ruptura e menor falha na madeira, consequentemente maior falha no adesivo.

Com base nos requisitos da norma européia, pode-se dizer que os compensados manufaturados com a resina poliuretana à base de mamona, tratamentos 1 e 4, podem ser indicados ao uso interior, intermediário e exterior. Os demais podem ser indicados ao uso interior e intermediário.

5.1.5. Flexão estática

Os resultados médios de Módulo de Ruptura (MOR) e Módulo de Elasticidade (MOE) na flexão estática, determinados para cada chapa de compensado, são apresentados na Tabela 34.

Tabela 34 - Resultados médios de módulo de ruptura e módulo de elasticidade para cada compensado.

Chapa	Tratamentos	Flexão estática paralela às fibras*		Flexão estática perpendicular às fibras*	
		MOE (MPa)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)
1	1	11495	92,98	6498	67,88
2		11845	91,75	5940	59,58
3		11676	94,28	6072	60,91
4		12331	93,09	5989	61,60
5	2	10862	84,53	5537	59,31
6		11473	83,19	5655	49,25
7		11180	86,99	5898	53,63
8		10210	81,60	5284	51,53
9	3	11027	82,52	6163	51,75
10		10774	85,47	5762	49,96
11		11484	84,72	5892	55,50
12		10692	87,99	5864	57,15
13	4	10359	80,52	4842	49,49
14		9768	75,97	4995	47,97
15		10879	78,90	5052	50,22
16		10242	81,12	4659	48,88
Média		11018	85,35	5631	54,66
CV(%)		6,19	6,40	9,28	10,67

*Direção das fibras das lâminas externas.

Foram encontradas, nas análises de variância para as variáveis MOR paralelo e MOR perpendicular (Anexo II, Tabela 97 e 98), diferenças significativas ao nível de 95% de probabilidade entre os tratamentos para os fatores temperatura e gramatura. Não houve interação significativa entre os fatores.

Os resultados dos testes de médias de Tukey, para as variáveis MOR paralelo e MOR perpendicular, são apresentados nas Tabelas 35 a 38.

Tabela 35 - Teste de Tukey para o MOR paralelo às fibras para o fator temperatura.

Fonte de variação: Temperatura (ºC)	Número de repetições	MOR paralelo médio (MPa)	5%*
60	32	89,10	a
90	32	81,62	b

*Médias seguidas por letras distintas diferem entre si ao nível de significância indicado.

Tabela 36 - Teste de Tukey para o MOR paralelo às fibras para o fator gramatura.

Fonte de variação: Gramatura (g/m^2)	Número de repetições	MOR paralelo médio (MPa)	5%*
200	32	88,55	a
180	32	82,15	b

*Médias seguidas por letras distintas diferem entre si ao nível de significância indicado.

Tabela 37 - Teste de Tukey para o MOR perpendicular às fibras para o fator temperatura.

Fonte de variação: Temperatura (ºC)	Número de repetições	MOR perpendicular médio (MPa)	5%*
60	32	58,16	a
90	32	51,28	b

*Médias seguidas por letras iguais não diferem entre si ao nível de significância indicado.

Tabela 38 - Teste de Tukey para o MOR perpendicular às fibras para o fator gramatura.

Fonte de variação: Gramatura (g/m^2)	Número de repetições	MOR perpendicular médio (MPa)	5%*
200	32	58,08	a
180	32	51,36	b

*Médias seguidas por letras distintas diferem entre si ao nível de significância indicado.

Nas análises de variância, Anexo 2, Tabela 99 e 100, foram encontradas diferenças significativas ao nível de 95% de probabilidade para os valores médios do MOE paralelo e MOE perpendicular, entre os tratamentos, dos fatores temperatura e gramatura. Sendo assim, os resultados dos testes de médias de Tukey são apresentados nas Tabelas 39 a 42.

Tabela 39 - Teste de Tukey para o MOE paralelo às fibras para o fator temperatura.

Fonte de variação: Temperatura (ºC)	Número de repetições	MOE paralelo médio (MPa)	5%*
60	32	11415	a
90	32	10621	b

*Médias seguidas por letras distintas diferem entre si ao nível de significância indicado.

Tabela 40 - Teste de Tukey para o MOE paralelo às fibras para o fator gramatura.

Fonte de variação: Gramatura (g/m^2)	Número de repetições	MOE paralelo médio (MPa)	5%*
200	32	11384	a
180	32	10653	b

*Médias seguidas por letras distintas diferem entre si ao nível de significância indicado.

Tabela 41 - Teste de Tukey para o MOE perpendicular às fibras para o fator temperatura.

Fonte de variação: Temperatura (ºC)	Número de repetições	MOE perpendicular médio (MPa)	5%*
60	32	5987	a
90	32	5241	b

*Médias seguidas por letras distintas diferem entre si ao nível de significância indicado.

Tabela 42 - Teste de Tukey para o MOE perpendicular às fibras para o fator gramatura.

Fonte de variação: Gramatura (g/m^2)	Número de repetições	MOE perpendicular médio (MPa)	5%*
200	32	5824	a
180	32	5405	b

*Médias seguidas por letras distintas diferem entre si ao nível de significância indicado.

A NBR 9532 (1986) adota módulo de elasticidade de 4000 MPa para classificar o compensado como fôrma para concreto. Já a norma DIN 68792[4] apud Pereyra (1984) exige os requisitos apresentados na Tabela 43. Almeida (2002) afirma que há uma forte tendência para a norma brasileira, ora em revisão, vir a adotar as especificações da norma DIN para fôrmas para concreto.

[4] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. *DIN 68792:* Large área shuttering panels of veneer plywood for concrete and reinforced concrete. Berlin: Beuth Verlag. 1979.

Tabela 43 - Requisitos para fôrma para concreto.

Direção das fibras das lâminas externas	Número de lâminas	Especificação mínima à flexão estática	
		MOR (MPa)	MOE (MPa)
Paralela	3	75	8500
	5	45	5000
	Acima de 5	35	4000
Perpendicular	3	20	2000
	5	30	2500
	Acima de 5	40	4500

Fonte: DIN 68792 apud Pereyra (1984).

Os valores do MOR e MOE dos compensados, objeto deste estudo, atendem às exigências das normas NBR 9532 (1986) e DIN 68792 (1979) para a utilização em fôrma para concreto.

Os valores médios do MOE na direção paralela foram em média 49% superiores aos valores obtidos na direção perpendicular, considerando todos os tratamentos. Para o MOR, esta diferença foi 36%, em média. A diferença entre os valores do MOR e MOE, nas duas direções, já foi observada por Pio (1996), Interamnense (1998) e Almeida (2002), que apresentam valores em média de 55% para o MOR e aproximadamente 70% para o MOE. Todos estudaram compensados de cinco lâminas. O menor valor para estas diferenças foi encontrado por Pereyra (1994), cerca de 12% para o MOR e 17% para o MOE, em compensados de 9 lâminas.

5.1.6. Comparação dos valores de propriedades dos compensados produzidos com a resina à base de mamona com os produzidos com uréia e fenol-formaldeído

Na Tabela 44, são apresentados os valores médios das propriedades físicas para os compensados. Para o compensado produzido com o resina poliuretana à base de mamona, são apresentados os valores médios de cada tratamento, para os demais compensados, são apresentados os valores médios de quatro chapas para cada resina.

Tabela 44 - Valores médios das propriedades físico-mecânicas dos compensados - comparação entre compensados prensados com diferentes adesivos.

Compensados		ρ (g/cm^3)	U (%)	R (%)	I.R. (%)	I (%)	A.A.T. (%)
Poliuretano à base de mamona	1	0,75	10,5	1,9	9,2	7,3	29,5
	2	0,77	10,4	1,9	7,8	5,9	29,6
	3	0,77	10,6	1,6	8,4	6,8	28,3
	4	0,77	10,6	1,7	9,1	7,4	30,0
Uréia-formaldeído		0,78	10,9	1,5	9,1	7,1	45,9
Fenol-formaldeído		0,78	10,5	2,3	8,2	5,45	31,0

ρ = Massa específica aparente; U = teor de umidade; R = recuperação em espessura; IR = inchamento mais recuperação em espessura, I = inchamento e AAT = absorção de água total.

Por comparação entre os dados fornecidos pela Tabela 44, observa-se que a massa específica aparente e o teor de umidade apresentaram valores médios próximos.

A recuperação em espessura apresentou valores superiores para os compensados fenólicos, o que indica a capacidade deste compensado de readquirir a espessura inicial após imersão em água e posterior secagem. O valor mais baixo foi para os compensados de uréia, este adesivo apresenta a característica de não resistência à água. Os compensados com o a resina poliuretana à base de mamona apresentaram valores médios intermediários.

O inchamento, acréscimo da espessura da chapa de compensado quando submetida à absorção de água, foi inferior para as chapas produzidas com a resina à base de mamona, também é um indicativo da boa estabilidade dimensional destes compensados.

Os valores médios de tensão de ruptura e falha na madeira obtidos no ensaio de resistência da colagem ao esforço de cisalhamento são apresentados na Tabela 45.

Tabela 45 - Valores médios de tensão de ruptura e falha na madeira - comparação entre compensados prensados com diferentes adesivos.

Resistência da colagem ao esforço de cisalhamento							
Compensados		**TR (MPa)**	**Falha (%)**	**TR (MPa)**	**Falha (%)**	**TR (MPa)**	**Falha (%)**
Poliuretano à base de mamona	1	3,76	70	2,78	30	1,87	20
	2	3,34	60	2,27	30	*	*
	3	3,48	50	2,69	30	1,52	10
	4	3,13	50	2,40	20	*	*
Uréia-formaldeído		2,03	30	1,55	20	*	*
Fenol-formaldeído		2,7	80	2	40	1,8	10

*Os corpos-de-prova (CP) delaminaram na fervura. [a]Após imersão do corpo-de-prova em água por 24 horas. [b]Após imersão do CP em água fervente por 4 horas e secos por vinte horas a 62ºC. Novamente submersos em água fervente por 4 horas, resfriado em água fria e ensaiados.

Na Tabela 45, é observado que os valores de tensão de ruptura para os compensados com a resina poliuretana à base de mamona, foram superiores a todos os compensados. Porém, os compensados fenólicos apresentaram maior falha na madeira.

Na Tabela 46 são apresentados os valores médios para os módulos de ruptura e os módulos de elasticidade, na direção paralela e perpendicular às fibras das lâminas externas, obtidos no ensaio de flexão estática dos compensados.

Tabela 46 - Valores médios de MOR e MOE na flexão estática - comparação entre compensados prensados com diferentes adesivos.

Compensados		**Flexão estática paralela às fibras***		**Flexão estática perpendicular às fibras***	
		MOE (MPa)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)
Poliuretano à base de mamona	1	11837	93	6125	62
	2	10931	84	5593	53
	3	10994	85	5920	54
	4	10312	79	4887	49
Uréia-formaldeído		10056	78	3951	41
Fenol-formaldeído		11221	86	5127	44

*Direção das fibras das lâminas externas.

Os valores inferiores de MOR e MOE, em ambas as direções (Tabela 46), foram para os compensados manufaturados com o adesivo uréia-formaldeído. Os compensados com a resina à base de mamona apresentaram valores superiores de MOR, em relação aos demais compensados e, apenas as chapas do tratamento 4, apresentaram valores de MOR levemente inferiores aos compensados fenólicos, na direção paralela às fibras e levemente superiores, na perpendicular.

5.2. Resultados obtidos para a madeira aglomerada

5.2.1. Densidade aparente, razão de compactação e teor de umidade

Na Tabela 47 são apresentados os valores médios da densidade aparente, razão de compactação e teor de umidade para os aglomerados manufaturados com a resina poliuretana à base de mamona.

Tabela 47 - Valores médios da densidade aparente, razão de compactação e teor de umidade para cada aglomerado.

Chapas	Tratamento	Densidade aparente (g/cm^3)	Razão de compactação	Teor de umidade (%)
1	1	0,81	1,35	8,19
2		0,78	1,30	8,20
3		0,80	1,33	8,47
4		0,79	1,32	8,52
5	2	0,79	1,32	8,46
6		0,82	1,37	8,48
7		0,79	1,32	8,70
8		0,78	1,30	8,21
9	3	0,79	1,32	8,38
10		0,77	1,30	8,39
11		0,83	1,38	8,49
12		0,78	1,30	8,41
13	4	0,78	1,30	8,16
14		0,80	1,33	8,47
15		0,78	1,30	8,40
16		0,80	1,33	8,54
Média		0,79	1,32	8,41
CV(%)		2,38	2,38	1,37

O Boletim Madepan (2004) apresenta um valor mínimo de 0,60 g/cm^3 para aglomerados com espessura de 150 a 200 mm. As chapas foram produzidas para a mesma densidade final de 0,75 g/cm^3, e uma razão de compactação de 1,3. No entanto, devido às dificuldades de um controle rigoroso sobre algumas variáveis do processo de manufatura, ao observar a Tabela 36, foram constatadas pequenas diferenças entre as médias das densidades das chapas produzidas, o que resultou numa pequena variação da

razão de compactação. Iwakiri (1998) apresenta um valor mínimo de 1,3 para a razão de compactação, relação entre a densidade da chapa e da madeira de origem, valor atendido por todas as chapas.

Apesar da pequena diferença entre as densidades dos aglomerados e respectivas razões de compactação, nas análises de variância (Anexo II – Tabela 101 a 103), para as variáveis respostas densidade aparente, teor de umidade e razão de compactação, não foram constatadas diferenças significativas entre os tratamentos para os fatores analisados, nem interação significativa entre os fatores dos tratamentos.

5.2.2. Inchamento e absorção de água

Na Tabela 48 são apresentados os resultados médios para as propriedades de inchamento (2 e 24 horas) e absorção de água (2 e 24 horas).

Tabela 48 - Valores médios para inchamento e absorção de água dos aglomerados.

Chapa	Tratamentos	Inchamento		Absorção de água	
		2 horas	24 horas	2 horas	24 horas
1	1	6,80	20,81	13,84	34,68
2		7,48	20,90	13,22	35,84
3		5,88	19,11	13,71	35,16
4		6,27	19,80	13,55	35,93
5	2	3,96	17,53	12,17	26,95
6		4,78	21,28	12,28	32,21
7		3,86	17,47	12,59	27,32
8		3,76	17,49	12,15	26,60
9	3	8,43	21,75	14,41	36,60
10		8,58	21,10	14,39	36,11
11		8,16	21,52	14,46	35,96
12		8,83	22,16	14,15	36,16
13	4	7,04	23,89	12,68	36,22
14		7,45	21,35	12,72	35,72
15		6,65	20,49	13,59	36,82
16		5,04	19,20	12,92	30,93
Média		7,52	21,43	13,66	35,57
CV(%)		16,51	6,28	5,78	5,35

As análises de variância (Anexo II – Tabelas 104 e 105) para as variáveis respostas inchamento 2 e 24 horas, apresentaram diferenças significativas ao nível de probabilidade de 95%, para os fatores temperatura e parafina. Os Testes de Tukey para estas variáveis são apresentados nas Tabelas 49 a 52.

Tabela 49 - Teste de Tukey para o inchamento 2 horas do fator temperatura dos aglomerados.

Fonte de variação: Temperatura (ºC)	Número de repetições	Inchamento 2 horas (%)	5%*
60	48	7,55	a
90	48	5,32	b

*Médias seguidas por letras distintas diferem entre si ao nível de significância indicado.

Tabela 50 - Teste de Tukey para o inchamento 2 horas do fator parafina dos aglomerados.

Fonte de variação: Parafina	Número de repetições	Inchamento 2 horas (%)	5%*
com	48	5,35	a
sem	48	7,52	b

*Médias seguidas por letras distintas diferem entre si ao nível de significância indicado.

Tabela 51 - Teste de Tukey para o inchamento 24 horas do fator temperatura dos aglomerados.

Fonte de variação: Temperatura (ºC)	Número de repetições	Inchamento 24 horas (%)	5%*
60	48	20,84	a
90	48	19,72	b

*Médias seguidas por letras distintas diferem entre si ao nível de significância indicado.

Tabela 52 - Teste de Tukey para o inchamento 24 horas do fator parafina dos aglomerados.

Fonte de variação: Parafina	Número de repetições	Inchamento 24 horas (%)	5%*
com	48	19,23	a
sem	48	21,35	b

*Médias seguidas por letras distintas diferem entre si ao nível de significância indicado.

Os dados nas Tabelas 49 a 52 apresentam menores valores de inchamento, tanto 2 horas quanto 24 horas, para o tratamento 2, aglomerados prensados a 90ºC com emulsão de parafina adicionada à composição.

A NBR 14810 - 2 (2002) e Boletim Madepan (2004) estipulam como 8% o valor máximo para o inchamento dos aglomerados após imersão em água por 2 horas. Apenas o tratamento 3 (aglomerados prensados a 60ºC sem adição de emulsão de parafina) apresentou valores médios de inchamento 2 horas levemente superiores aos exigidos.

Nascimento (2003) apresenta valores médios de inchamento 2 horas, para chapas industrializadas de Eucalipto, de 9%, superior aos valores médios apresentados na Tabela 37.

A normalização brasileira não especifica valor de inchamento 24 horas para as chapas de aglomerado. Nascimento (2003) apresenta para chapa industrializada de Eucalipto, valor de 21% para inchamento 24 horas, valor próximo ao obtido neste trabalho.

As análises de variância (Anexo II - Tabela 106), para a variável absorção de água 2 horas, apresentaram diferenças significativas ao nível de probabilidade de 95%, para os fatores temperatura e parafina. Não apresentaram interação significativa para os fatores dos tratamentos. Para a absorção 24 horas, na análise de variância (Anexo II - Tabela

107), diferenças significativas para todos os fatores foram notadas. Os Testes de Tukey para estas variáveis são apresentados nas Tabelas 53 a 57.

Tabela 53 - Teste de Tukey para a absorção de água 2 horas do fator temperatura dos aglomerados.

Fonte de variação: Temperatura (ºC)	Número de repetições	Absorção média 2 horas (%)	5%*
60	48	13,92	a
90	48	12,57	b

*Médias seguidas por letras distintas diferem entre si ao nível de significância indicado.

Tabela 54 - Teste de Tukey para a absorção de água 2 horas do fator parafina dos aglomerados.

Fonte de variação: Parafina	Número de repetições	Absorção média 2 horas (%)	5%*
com	48	12,83	a
sem	48	13,66	b

*Médias seguidas por letras distintas diferem entre si ao nível de significância indicado.

Tabela 55 - Teste de Tukey para a absorção de água 24 horas do fator temperatura dos aglomerados.

Fonte de variação: Temperatura (ºC)	Número de repetições	Absorção média 24 horas (%)	5%*
60	48	35,807	a
90	48	31,596	b

*Médias seguidas por letras distintas diferem entre si ao nível de significância indicado.

Tabela 56 - Teste de Tukey para a absorção de água 24 horas do fator parafina dos aglomerados.

Fonte de variação: Parafina	Número de repetições	Absorção média 24 horas (%)	5%*
com	48	31,84	a
sem	48	35,57	b

*Médias seguidas por letras distintas diferem entre si ao nível de significância indicado.

Tabela 57 - Teste de Tukey para a absorção de água 24 horas para a interação dos fatores dos tratamentos dos aglomerados.

Fonte de variação: Interação entre temperatura e parafina	Número de repetições	Absorção média de água (%)	
60 ºC - com	24	35,41	
90 ºC - com	24	28,27	
60 ºC - sem	24	36,21	
90 ºC - sem	24	34,92	
Fator interação para 5%* de significância			
Tratamentos	1	2	3
2	a		
	b		
3	a	a	
	a	b	
4	a	a	a
	a	b	a

*Médias seguidas por letras distintas diferem entre si ao nível de significância indicado.

Nas Tabelas 53 a 56, os valores médios para absorção de água 2 horas e 24 horas dos aglomerados foram inferiores para o tratamento 2. Os aglomerados, neste tratamento, foram prensados com parafina, a 90ºC de temperatura. A diferença do tratamento 2 em

relação aos demais tratamentos é confirmada na Tabela 57. Quando da interação entre os fatores para todos os tratamentos analisados, o tratamento 2 apresentou valor médio inferior aos demais tratamentos.

Os documentos normativos brasileiros não apresentam exigências quanto à absorção de água 2 e 24 horas dos aglomerados. Nascimento (2003) apresentou valores médios para chapas industrializadas de Eucalipto, 15,6 % e 28,9% superiores aos valores médios apresentados na Tabela 37, para absorção de água 2 e 24 horas, respectivamente.

5.2.3. Tração perpendicular e arranque de parafuso na face

Os resultados obtidos para a tração perpendicular e arranque de parafuso na superfície dos aglomerados, produzidos com a resina poliuretana à base de mamona, são apresentados na Tabela 58.

Tabela 58 - Valores médios obtidos para tração perpendicular e arranque de parafuso na superfície dos aglomerados.

Chapas	Tratamento	Tração perpendicular (MPa)	Arranque de parafuso (N)
1	1	0,61	6,26
2		0,71	7,63
3		0,66	6,66
4		0,69	7,27
5	2	0,92	10,57
6		1,22	11,29
7		1,07	10,99
8		1,14	11,74
9	3	1,16	10,27
10		0,94	10,11
11		0,87	9,09
12		0,87	9,38
13	4	0,90	12,78
14		0,91	14,11
15		1,02	12,73
16		0,81	11,75
Média		0,93	11,28
CV(%)		11,62	16,20

Na análise de variância (Anexo II - Tabela 108), para a variável resposta tração perpendicular dos aglomerados, foram notadas diferenças significativas entre os valores médios para o fator temperatura. Houve também interação significativa entre os tratamentos. Os testes de Tukey são apresentados nas Tabelas 59 e 60.

Tabela 59 - Teste de Tukey para a tração perpendicular do fator temperatura dos aglomerados.

Fonte de variação: Temperatura (ºC)	Número de repetições	Tração perpendicular (MPa)	5%*
60	40	0,81	a
90	40	1,00	b

*Médias seguidas por letras distintas diferem entre si ao nível de significância indicado.

Tabela 60 - Teste de Tukey para a tração perpendicular para a interação dos fatores dos tratamentos dos aglomerados.

Fonte de variação: Interação entre temperatura e parafina	Número de repetições	Tração perpendicular (MPa)	
60 ºC - com	20	0,66	
90 ºC - com	20	1,09	
60 ºC - sem	20	0,96	
90 ºC - sem	20	0,91	
Fator interação para 5%* de significância			
Tratamentos	1	2	3
2	a		
	b		
3	a	a	
	b	b	
4	a	a	a
	b	b	a

*Médias seguidas por letras distintas diferem entre si ao nível de significância indicado.

Quando o fator temperatura foi analisado, observa-se, na Tabela 59, que os valores de tração perpendicular foram superiores para os aglomerados prensados a 90ºC. Na Tabela 60, quando analisada a interação entre os fatores temperatura e parafina, o tratamento

que apresentou valores médios superiores foi o 2, aglomerados prensados com temperatura de 90ºC com adição de emulsão de parafina. O tratamento 3 (60ºC) apresentou valores médios de tração perpendicular próximos aos valores médios do tratamento 4 (90ºC), ambos sem adição de emulsão de parafina.

Para o tratamento 1 (60ºC, com parafina) os valores inferiores aos dos demais tratamentos apontam, segundo Iwakiri (1989), para uma adesão inferior entre as partículas, uma vez que, no ensaio de tração perpendicular, é medida a ligação interna das partículas, promovida pelo adesivo e constituintes da madeira.

A NBR 14810 - 2 (2002) e Boletim Madepan (2003) indicam valor mínimo, 0,35 MPa, para tração perpendicular de aglomerados, com espessura variando de 14 a 20 mm. Já a norma comercial americana, CS 236-66[5] apud Iwakiri (1989), indica o intervalo de 0,42 MPa a 0,49 MPa, para aglomerados produzidos com a resina uréia-formaldeído, com densidade compreendida entre 0,60 e 0,80 g/cm^3. Todos os aglomerados, objeto deste estudo, atenderam as exigências das normas brasileira e americana.

A análise de variância (Anexo II - Tabela 109) para a variável resposta arranque de parafuso, apresentou diferenças significativas entre os fatores de tratamento analisados (temperatura e parafina). Não houve interação significativa entre os tratamentos. Os testes de Tukey são apresentados nas Tabelas 61 e 62.

[5] COMMERCIAL STANDARD. Cs 236-66. Mat formed wood particleboards. FPJ, 5: 243-46, 1960.

Tabela 61 - Teste de Tukey para o arranque de parafuso na superfície do fator temperatura dos aglomerados.

Fonte de variação: Temperatura (ºC)	Número de repetições	Arranque de parafuso (N)	5%*
60	40	8,32	a
90	40	12,00	b

*Médias seguidas por letras distintas diferem entre si ao nível de significância indicado.

Tabela 62 - Teste de Tukey para o arranque de parafuso na superfície do fator parafina dos aglomerados.

Fonte de variação: Parafina	Número de repetições	Arranque de parafuso (N)	5%*
com	40	9,04	a
sem	40	11,28	b

*Médias seguidas por letras distintas diferem entre si ao nível de significância indicado.

Para o teste de arranque de parafuso na superfície, os valores médios para o tratamento 4 (aglomerados prensados à temperatura de 90ºC, sem adição de parafina), foram superiores aos valores médios dos demais tratamentos, quando avaliados os fatores temperatura e parafina.

Na Tabela 47, é notória a diferença entre o tratamento 1 (60ºC, com adição de parafina) e os demais tratamentos. Com base nas análises dos dados das Tabelas 50 e 51, é possível afirmar que a parafina diminui significantemente a propriedade de arranque de parafuso na superfície das chapas de aglomerado, principalmente com a temperatura de 60ºC.

Para aglomerados com espessura de 14 a 20mm, a NBR 14810 - 2 (2002) estabelece um valor mínimo de 8N para arrancamento de parafuso na superfície dos aglomerados. Valor contrário ao apresentado por CS 236-66 apud Iwakiri (1989), 10,2N, para

aglomerados com densidade de 0,60 e 0,80 g/cm^3. Já Nascimento (2003) apresenta, para o arranque de parafuso de chapas industrializadas de Eucalipto, um valor médio de 9,7N.

Os valores de arranque de parafuso para os aglomerados produzidos neste trabalho, exceto os do tratamento 1, apresentaram valores superiores ao exigido pela NBR 14810 - 2. As chapas de aglomerado, tratamento 2 e 4, apresentaram valores médios superiores ao obtido por Nascimento (2003). Já no tratamento 3, as chapas 9 e 10 apresentaram valores médios levemente superiores e as chapas 11 e 12, valores médios levemente inferiores.

5.2.4. Flexão estática

Na Tabela 63 são apresentados os resultados obtidos para o Módulo de Ruptura (MOR) e o Módulo de Elasticidade (MOE) para cada aglomerado.

Tabela 63 - Valores médios para MOR e MOE na flexão estática dos aglomerados.

Chapas	Tratamento	Flexão estática	
		MOE (MPa)	MOR (MPa)
1	1	2016	16,25
2		2155	16,15
3		2354	17,06
4		2412	16,82
5	2	2352	17,19
6		2564	18,19
7		2447	17,63
8		2454	18,24
9	3	2021	16,31
10		2139	16,57
11		2088	16,85
12		2126	16,40
13	4	2456	17,70
14		2601	17,63
15		2046	16,13
16		2026	15,46
Média		2188	16,63
CV(%)		9,97	4,54

Segundo as análises de variância (Anexo II - Tabela 110 e 111), não houve diferença significativa ao nível de 95% de probabilidade, entre os valores médios das variáveis MOR e MOE, dos tratamentos, para os fatores analisados. Porém, em ambos os casos, foi observada interação significativa entre os fatores dos tratamentos. O teste de Tukey, para o MOR e MOE na flexão estática dos aglomerados, fator interação, é apresentado na Tabela 64 e 65.

Tabela 64 - Teste de Tukey para o Módulo de Ruptura na flexão estática do fator interação dos aglomerados.

Fonte de variação: Interação entre temperatura e parafina	Número de repetições	Módulo de Ruptura na flexão estática (MPa)	
60 ºC - com	20	16,56	
90 ºC - com	20	17,74	
60 ºC - sem	20	16,49	
90 ºC - sem	20	16,82	
Fator interação para 5%* de significância			
Tratamentos	1	2	3
2	a		
	b		
3	a	a	
	a	b	
4	a	a	a
	b	a	b

*Médias seguidas por letras distintas diferem entre si ao nível de significância indicado.

Tabela 65 - Teste de Tukey para o Módulo de Elasticidade na flexão estática do fator interação dos aglomerados.

Fonte de variação: Interação entre temperatura e parafina	Número de repetições	Módulo de Elasticidade na flexão estática (MPa)	
60 ºC – com	20	2200	
90 ºC – com	20	2412	
60 ºC – sem	20	2092	
90 ºC – sem	20	2327	
Fator interação para 5%* de significância			
Tratamentos	1	2	3
2	a		
	b		
3	a	a	
	a	b	
4	a	a	a
	a	a	b

*Médias seguidas por letras distintas diferem entre si ao nível de significância indicado.

Para o fator interação, entre temperatura e parafina (Tabela 64), os tratamentos 2 e 4, aglomerados prensados a 90ºC, não apresentaram diferença significativa entre suas médias, assim como os tratamentos 1 e 3. Porém, os tratamentos 2 e 4 apresentaram valores médios superiores de MOR em relação aos tratamentos 1 e 3 (60ºC).

Os valores médios do MOE (Tabela 65), para os tratamentos 2, foram superiores aos valores dos tratamentos 1, 3 e 4. Os tratamentos 2 e 4 não apresentam variação entre seus valores médios, assim como os tratamentos 1 e 3. Também não há diferenças significativas para o tratamento 1 em comparação com o tratamento 4.

Dias e Nascimento (2002) apresentaram valores de 17,4 MPa e 2709 MPa, para MOR e MOE, respectivamente, para chapas industrializadas de Eucalipto. A NBR 14810 - 2 (2002) exige um MOR mínimo de 16 MPa para chapas de aglomerado com espessura compreendida entre 14 e 20 mm, mas não apresenta valor mínimo de MOE na flexão estática. A norma comercial americana CS 236 - 66 apresenta exigência de MOR, 11,2 MPa e MOE, 2450MPa, para aglomerados com densidade de 0,60 e 0,80 g/cm^3. Na Tabela 50, todos os valores médios de MOR atenderam as normalizações, brasileira e americana. Os valores de MOR estão próximos aos apresentados por Dias e Nascimento (2002).

Os dados da Tabela 63, tratamento 2, para MOE na flexão estática, foram próximos aos exigidos pela CS 236 – 66.

5.2.5. Comparação dos valores de propriedades dos aglomerados produzidos com a resina à base de mamona com os produzidos com uréia-formaldeído

Na Tabela 66, são apresentados os valores médios das propriedades físicas para os aglomerados. Para o aglomerado produzido com a resina poliuretana à base de mamona, são apresentados os valores médios de cada tratamento, para os aglomerados produzidos com a uréia-formaldeído são apresentados os valores médios de quatro chapas.

Tabela 66 - Valores médios das propriedades físico-mecânicas dos aglomerados - comparação entre aglomerados prensados com diferentes adesivos.

Aglomerados		ρ (g/cm^3)	U (%)	I 2 (%)	I 24 (%)	AA2 (%)	AA24 (%)
	1	0,80	8,34	6,61	20,15	13,58	35,40
Poliuretano à	2	0,80	8,46	4,09	18,44	12,30	28,27
base de mamona	3	0,79	8,42	8,50	21,63	14,35	36,21
	4	0,79	8,39	6,55	21,23	12,98	34,92
Uréia-formaldeído		0,78	8,41	11,75	35,29	22,91	55,72

ρ = Densidade aparente; U = teor de umidade; I 2 = inchamento duas horas; I 24 = inchamento vinte e quatro horas, A.A. 2 = absorção de água duas horas e A.A. 24 = absorção de água vinte e quatro horas.

Por comparação entre os dados da Tabela 66, a densidade aparente para os aglomerados produzidos com a resina poliuretana à base de mamona apresentaram valores médios levemente superiores aos aglomerados produzidos com a uréia-formaldeído.

Os valores de inchamento duas e vinte quatro horas, absorção de água duas e vinte e quatro horas foram superiores nos aglomerados produzidos com a resina à base de uréia-formol. Estes dados indicam maior estabilidade dimensional nos aglomerados produzidos com a resina poliuretana à base de mamona.

As chapas produzidas com a uréia perdem mais água existente na formulação do adesivo, segundo boletim técnico Alba química 4072 (2004). A resina à base de uréia-formaldeído apresenta um teor de sólido de 64 a 66%. Já resina poliuretana à base de mamona apresenta 100% de teor de sólido. Como a espessura e a quantidade de adesivo e emulsão de parafina são fixas para ambas as chapas, as chapas com resina à base de mamona tendem a maior densidade pelo aumento da massa sólida.

Os valores médios obtidos para as propriedades mecânicas dos aglomerados são apresentados na Tabela 67. As propriedades são: Tração perpendicular (TP), Arranque

de parafuso (AP), Módulo de Ruptura (MOR) e Módulo de Elasticidade (MOE) na flexão estática.

Tabela 67 - Valores médios de TP, AP, MOR e MOE dos aglomerados - comparação entre aglomerados prensados com diferentes resinas.

Aglomerados		**TP (MPa)**	**AP (N)**	**MOE (MPa)**	**MOR (MPa)**
Poliuretano à base de mamona	1	6,42	9,05	2234	16,57
	2	1,09	11,15	2454	17,81
	3	0,96	9,71	2282	16,73
	4	0,91	12,84	2094	16,53
Uréia-formaldeído		0,426	8,70	2156	15,54

Os valores de tração perpendicular, arranque de parafuso e módulo de ruptura na flexão estática foram superiores para os aglomerados produzidos com a resina poliuretana à base de mamona. Já o módulo de elasticidade apresentou valores médios próximos para as chapas produzidas com ambas as resinas. Apenas a chapa do tratamento quatro apresentou valor de MOE levemente inferior à chapa produzida com a resina uréia-formol.

Mesmo apresentando valores médios inferiores aos aglomerados produzidos com a mamona, os valores de tração perpendicular (TP) e arranque de parafuso (AP), para as chapas produzidas com a uréia-formol, satisfazem os requisitos estabelecidos pela NBR 14810 – 2 (2002), TP de 0,35 e AP de 8 N. O MOR apresentou valores médios próximos ao requerido pela referida normalização, 16 MPa.

5.3. Análise dos coeficientes de variação

Foram obtidos baixos coeficientes de variação, para os compensados e aglomerados fabricados com a resina poliuretana à base de mamona, menores que 18%, valor apresentado por Rocco Lahr (1990) e Sales (1996) para madeira maciça, com umidade de 12%.

5.4. Análise por microscopia óptica

Nas Figuras 13 a 16 são apresentadas, imagens feitas por microscopia óptica, nos compensados produzidos com a resina poliuretana à base de mamona. As análises foram feitas em alguns corpos-de-prova, nas áreas rompidas, no ensaio de resistência da colagem ao esforço de cisalhamento, no ensaio seco. O objetivo desta análise é apresentar os tipos de ruptura ocorridos, observando a falha na madeira ou na linha de cola.

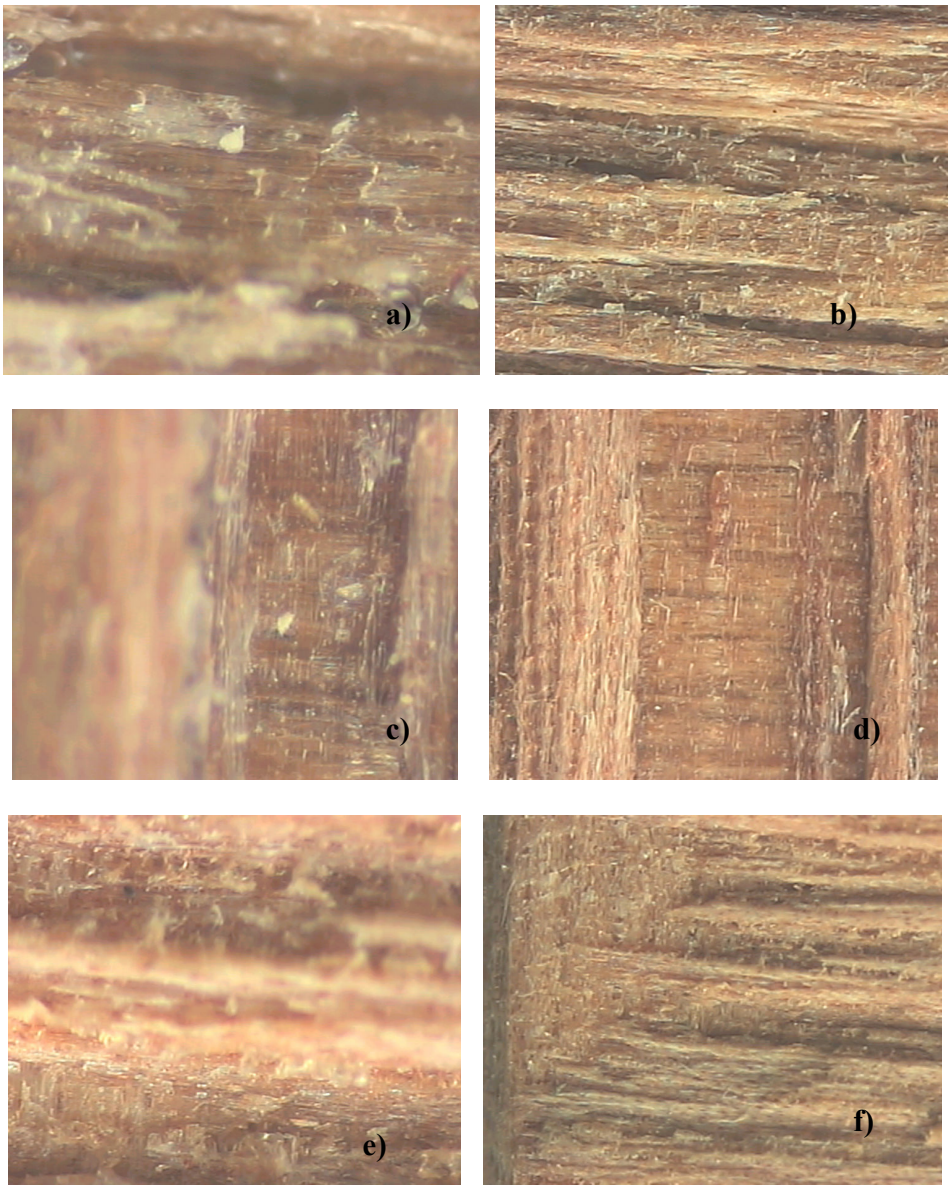


Figura 13 - Imagens microscópicas do compensado, com a resina à base de mamona, prensado a 60ºC, com gramatura de 200g/m^2. a) 110x, b)25x, c) 110x, d) 25x, e) 60x e f) 18x.

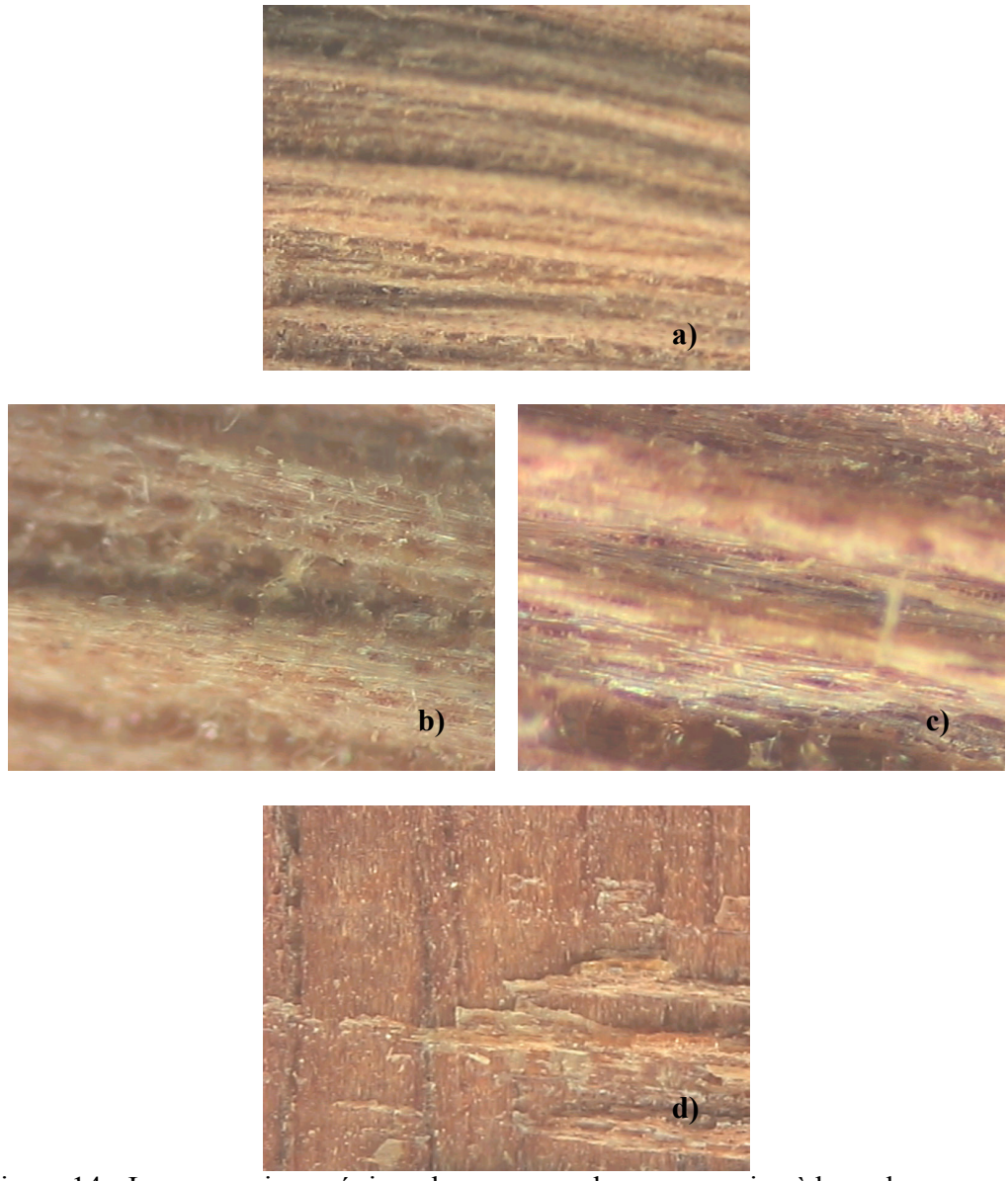


Figura 14 - Imagens microscópicas do compensado, com a resina à base de mamona, prensada a 90ºC, com gramatura de 200g/m^2. a) 20x, b) 20x, c) 65x e d)110x.

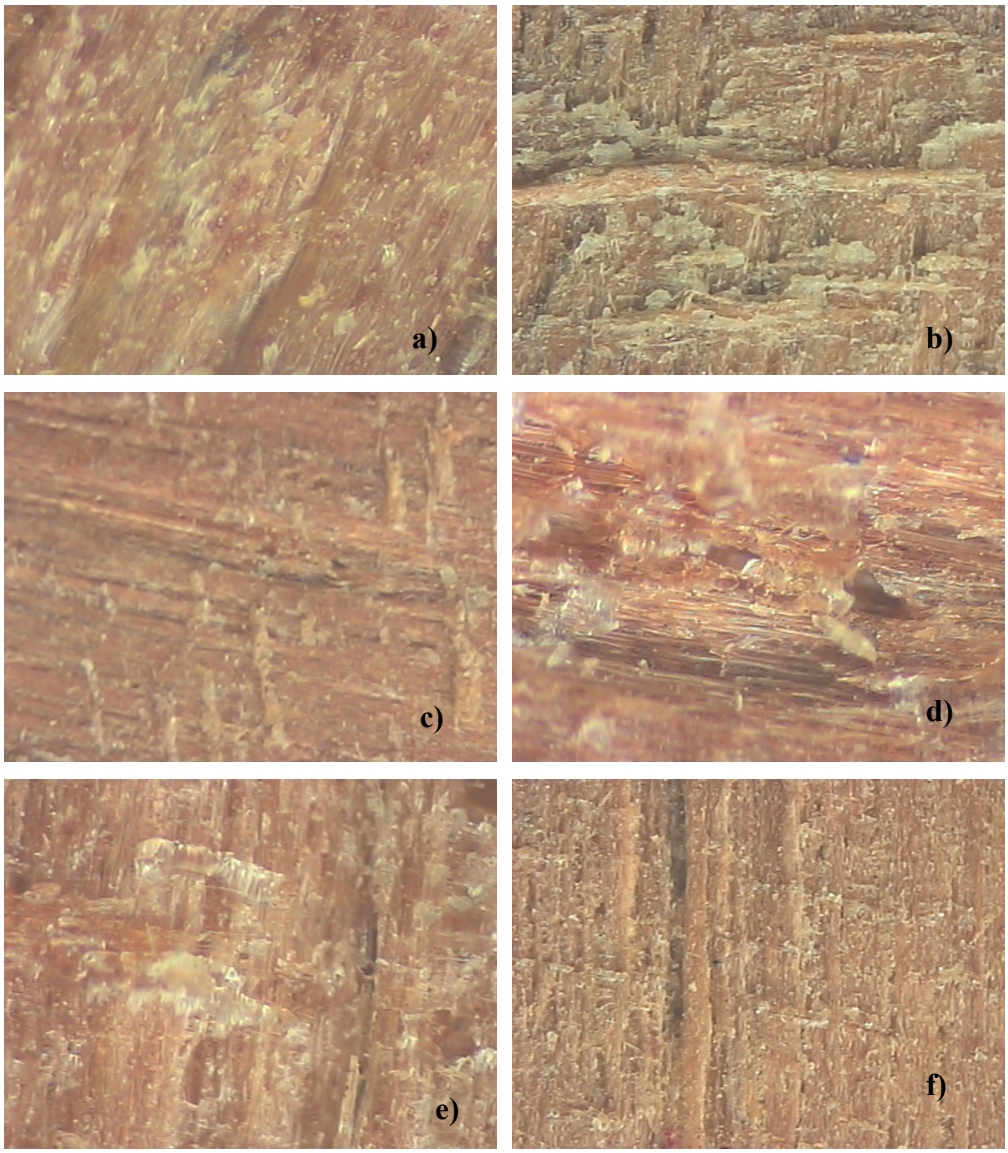


Figura 15 - Imagens microscópicas do compensado, com a resina à base de mamona, prensado a 90ºC, com gramatura de 180g/m^2. a) 25x, b) 110x, c)18x, d)20x, e) 80x e f)25x.

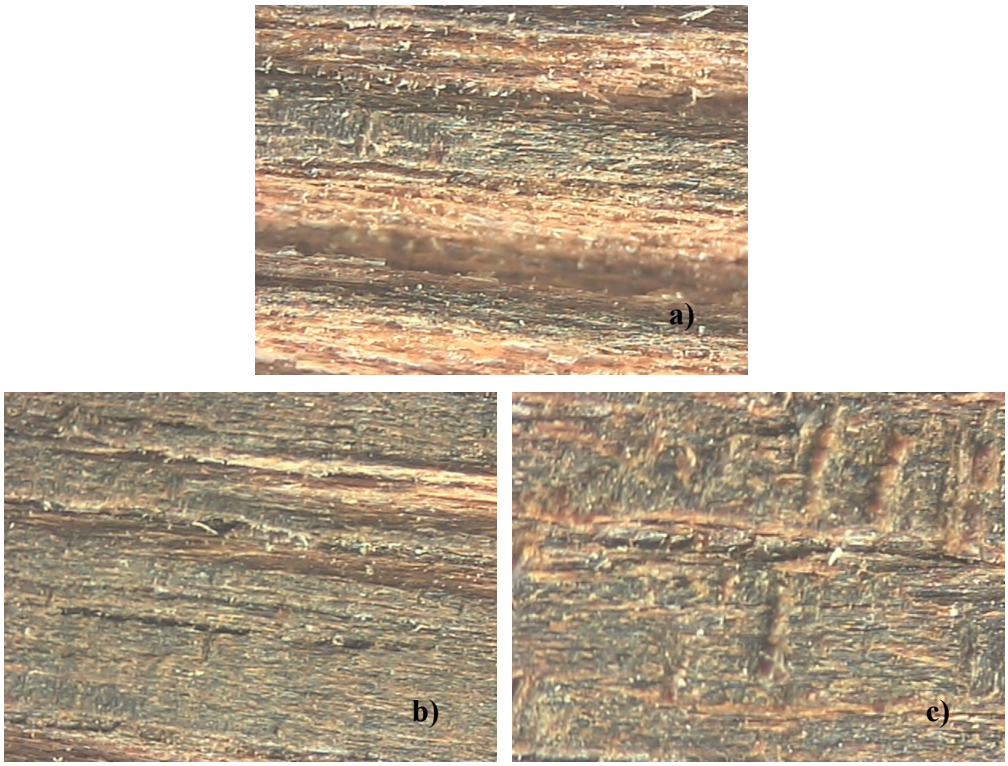


Figura 16 - Imagens microscópicas do compensado, com a resina fenol-formaldeído. a) 60x, b) 18x e c) 35x.

Na Figura 13, observa-se para uma mesma condição de prensagem, tipos diferentes de ruptura. Na Figura 13 (a e b) é visível a ocorrência de falha na linha de cola, já nas Figuras 13 (c, d, e, f) verificam-se falhas na madeira e falhas no adesivo.

Na Figura 14, ocorreram rupturas próximas às apresentadas na Figura 13. Os corpos-de-prova a e d com menos falha na resina e, os corpos-de-prova b e c, com falhas evidenciadas tanto na linha de cola quanto na madeira. Já na Figura 15, todos as imagens demonstraram, na ruptura por cisalhamento, maior falha na linha de colagem.

Para os compensados prensados com a resina fenol-formaldeído as rupturas não variaram em relação aos prensados com a resina à base de mamona. Na Figura 16a, há maior falha na madeira, as demais imagens, b e c, apresentaram falha no adesivo com menor falha na madeira. Por esta resina apresentar coloração escura, facilita a

visualização por microscopia óptica. No caso da resina poliuretana à base de mamona, a coloração é bem próxima à da madeira.

Nas Figuras 17 a 18 são apresentadas imagens feitas por microscopia óptica nas chapas de aglomerado, produzidas com a resina poliuretana à base de mamona. Foram feitas imagens nas camadas internas e externas da chapas. Para obtenção da imagem na camada interna o corpo-de-prova foi seccionado ao meio, na direção perpendicular a face.

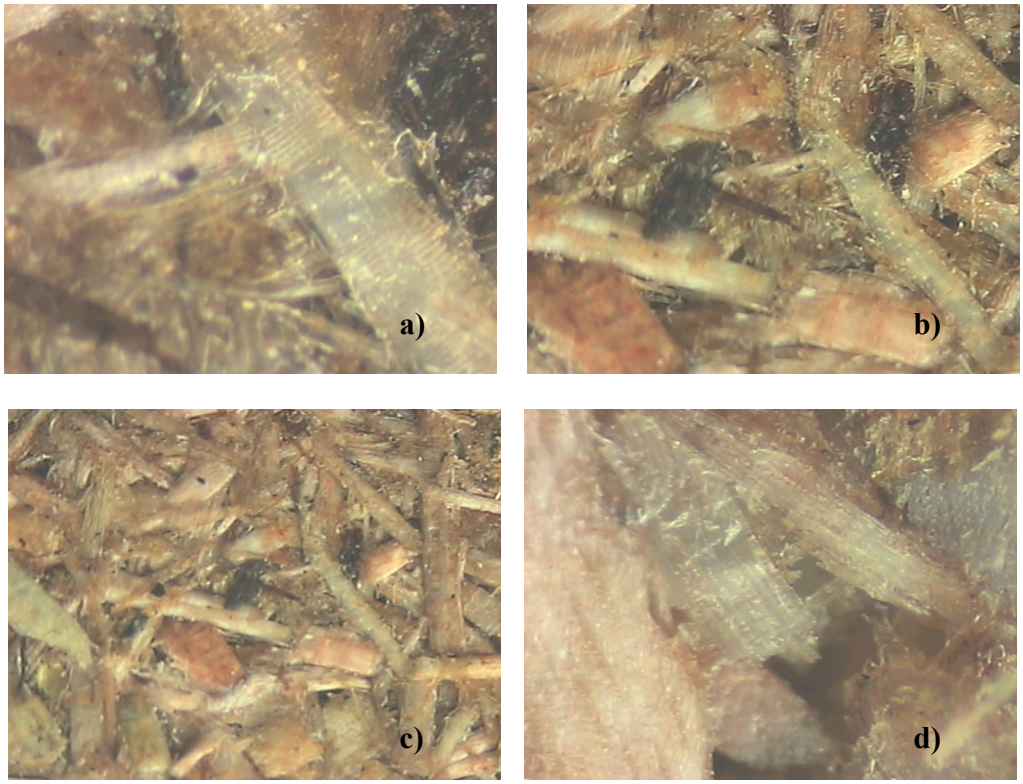


Figura 17 - Imagens microscópicas do aglomerado, com resina à base de mamona, prensado a 60ºC. a) camada externa 110x, b) camada externa 35x, c)camada externa 18x e d) camada interna 50x.

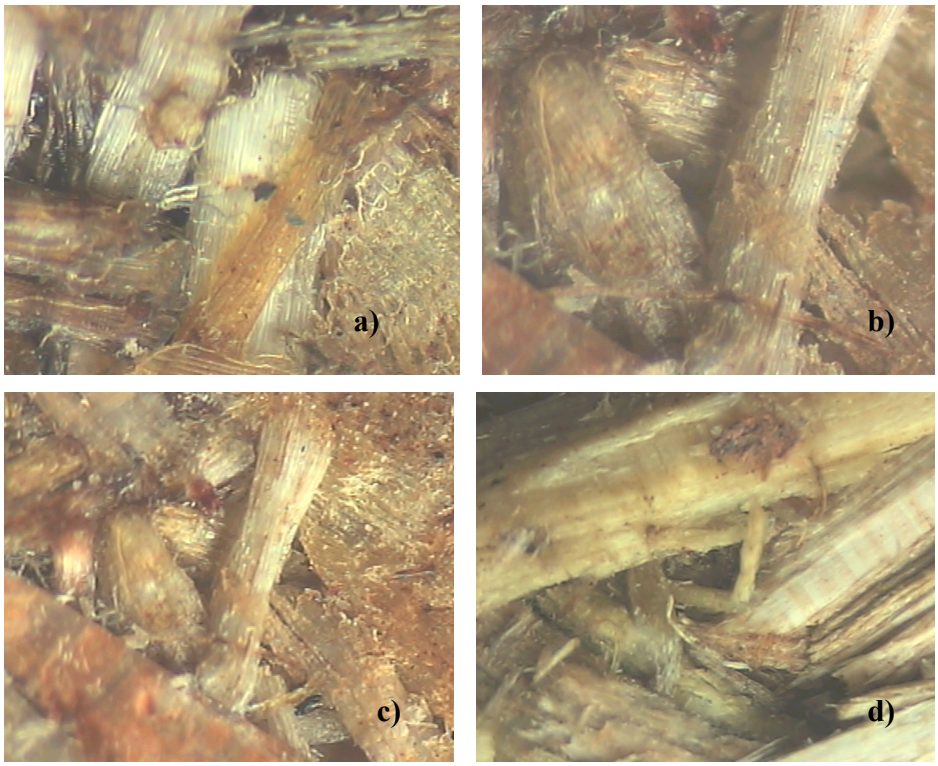


Figura 18 - Imagens microscópicas do aglomerado, com a resina à base de mamona, prensado a 90ºC. a) camada externa 110x, b) camada externa 110x, c) camada externa 50 x e d) camada interna 50x.

Na Figura 19 são apresentadas imagens feitas por microscopia óptica nas chapas de aglomerado, produzidas com a resina à base de uréia-formaldeído.

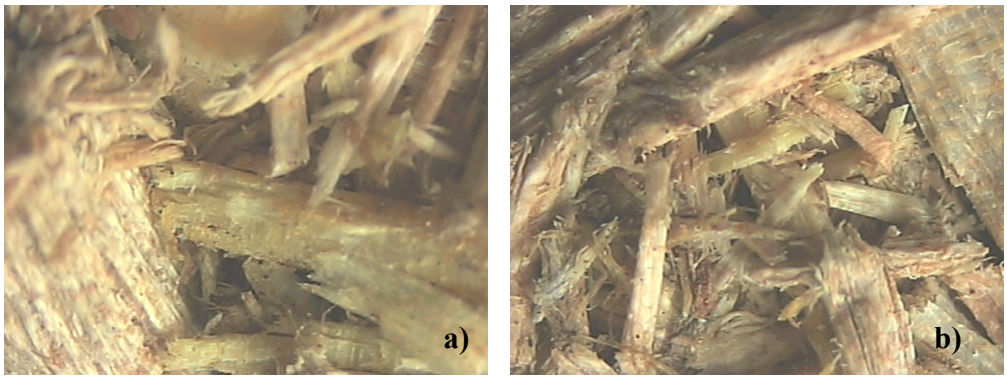


Figura 19 - Imagens microscópicas do aglomerado com a resina uréia. a) camada interna 50x, b) camada externa 35x e c) camada externa 35x.

Ao comparar as imagens das Figuras 17 e 18 com as Figura 19, observa-se que, os aglomerados produzidos com a resina poliuretana à base de mamona em comparação com os aglomerados produzidos com a resina uréia-formaldeído, apresentaram visualmente, áreas superficiais das partículas mais contornadas de resina, aspecto mais compacto, com menos presença de vazios.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Com base nos resultados apresentados, para as propriedades dos compensados produzidos com a resina poliuretana à base de mamona, pode-se concluir:

- Os valores da massa específica aparente e do teor de umidade, não variaram significantemente, para os diferentes tratamentos realizados. Apresentaram valor médio de 0,77 g/cm^3 para a massa específica aparente e 10,53% de umidade, com baixos coeficientes de variação entre as médias das chapas de compensado, 2,09 e 1,64, respectivamente. Os valores das massas específicas aparentes para os compensados apresentaram, em média, 2,7% de acréscimo em relação à madeira original.

- A absorção total de água para os compensados não apresentou variação entre os valores médios, para os diferentes tratamentos, que foram inferiores aos encontrados na literatura, para compensados prensados em outras condições.

- Os valores de inchamento mais recuperação em espessura e recuperação em espessura não apresentaram variação para os diferentes tratamentos analisados. Já os valores de inchamento apresentaram diferenças causadas pela interação entre temperatura e gramatura de cola, os compensados prensados a 90 ºC e gramatura de 200 g/m^2, apresentaram menor valor de inchamento, demonstrando a maior estabilidade dimensional desses compensados.

- Os valores de tensão de ruptura, determinados no ensaio de resistência da colagem ao esforço de cisalhamento (seco e úmido), variaram para os diferentes tratamentos analisados. O tratamento 1 (60ºC e 200 g/m^2) apresentou valores superiores em relação aos demais tratamentos, no ensaio seco. No ensaio úmido, os compensados prensados à temperatura de 60ºC, em ambas as gramaturas, apresentaram valores superiores de tensão de ruptura em relação aos prensados à 90ºC, também em ambas as gramaturas.

- Os compensados pertencentes ao tratamento 1 apresentaram maior falha na madeira em relação aos demais tratamentos, tanto no ensaio seco como úmido, indicativo da boa qualidade na colagem neste tratamento.

- No ensaio de fervura, apenas os compensados prensados a 60ºC, apresentaram valores de tensão de ruptura e falha na madeira, sendo o tratamento 1, gramatura de 200g/m^2, o que apresentou valores superiores de tensão de ruptura.

- Apesar da variação dos valores de cisalhamento, no ensaio seco e úmido, todas as chapas atenderam ao valor de tensão de ruptura estipulado pela EN 314-2 (1993), 1,0 MPa, sem exigência para percentagem de falha na madeira. Com base nestes requisitos da norma européia, pode-se dizer que os compensados manufaturados com a resina poliuretana à base de mamona, prensados a 60ºC, são indicados ao uso interior, intermediário e exterior. Os prensados a 90ºC mais podem ser indicados ao uso interior e intermediário.

- Os valores de módulo de ruptura e módulo de elasticidade na flexão estática, na direção paralela e perpendicular às fibras, apresentaram variações entre as médias para os tratamentos. Os compensados prensados à temperatura de 60ºC e gramatura 200g/m^2 (tratamento 1) apresentaram valores superiores aos compensados prensados nas outras condições. Apesar desta diferença, todos os valores de MOR e MOE dos compensados atendem às exigências das normas NBR 9532 (1986) e DIN 68792 (1979) para a utilização em fôrma para concreto.

- Quando comparados com os compensados produzidos com os adesivos uréia-formaldeído e fenol-formaldeído, os compensados produzidos com a resina poliuretana à base de mamona apresentaram valores coerentes e satisfatórios, levando em consideração as prescrições de cada adesivo.

Para as propriedades dos aglomerados produzidos com a resina poliuretana à base de mamona, pode-se concluir:

- Não foram constatadas variações entre os valores das propriedades densidade aparente, teor de umidade e razão de compactação dos aglomerados, para os diferentes tratamentos analisados. Os aglomerados apresentaram valores médios de densidade aparente de 0,79 g/cm^3 e razão de compactação de 1,37, compreendidos dentro do estipulado na literatura.

- Os valores de inchamento 2 horas e 24 horas dos aglomerados variaram entre os tratamentos. Os aglomerados prensados a 90ºC com emulsão de parafina adicionada à composição (tratamento 2) apresentaram valores inferiores de inchamento, tanto 2 horas quanto 24 horas. Os tratamentos 1, 2 e 4 atendem o valor mínimo de 8% para inchamento 2 horas, estipulado pela NBR 14810 - 2 (2002) e Boletim Madepan (2004).

- A absorção de água, 2 horas e 24 horas, apresentou diferenças entre os valores dos aglomerados produzidos nos diferentes tratamentos. Os valores médios para absorção de água, 2 horas e 24 horas, foram inferiores para o os aglomerados prensados a 90ºC (tratamento 2).

- Para a propriedade tração perpendicular dos aglomerados, os valores superiores foram para os prensados a 90ºC (tratamento 2 e 4), em relação aos prensados a 60ºC (tratamentos 1 e 3). Porém, o tratamento 2, com adição de parafina, apresentou valores superiores aos do tratamento 4, sem parafina. O tratamento 3 apresentou valores de

tração perpendicular próximos aos valores do tratamento 4, ambos prensados sem adição de emulsão de parafina. O tratamento 1 (60ºC, com parafina) apresentou resultados inferiores aos outros tratamentos, o que permite concluir que houve menor adesão entre as partículas nestes aglomerados.

- Os valores médios do arranque de parafuso, para o tratamento 4 (aglomerados prensados à temperatura de 90ºC, sem adição de parafina), foram superiores aos valores médios dos demais tratamentos. Já o tratamento 1 (60ºC, com adição de parafina) apresentou valores inferiores aos demais tratamentos. Com base nas análises dos dados para ambos os tratamentos, é possível afirmar que a parafina diminuiu significantemente a propriedade de arranque de parafuso na superfície das chapas de aglomerado, principalmente para os prensados à temperatura de 60ºC.

- Os tratamentos 2 e 4, aglomerados prensados a 90ºC de temperatura, não apresentaram diferenças entre seus valores médios de MOR na flexão estática, assim como não foram notadas variações entre os valores dos tratamentos 1 e 3 (aglomerados prensados à temperatura de 60ºC). Porém, os tratamentos 2 e 4 apresentaram valores médios superiores de MOR em relação aos tratamentos 1 e 3. Apesar desta variação, todos os valores médios de MOR atenderam as exigências das normalizações, brasileira e americana, para aglomerados industrializados.

- O valor médio do MOE na flexão estática, para os aglomerados prensados à temperatura de 90ºC, com parafina, foi superior aos valores dos demais aglomerados. Os tratamentos 2 e 4 (90ºC) não apresentam variação entre seus valores médios, assim como, os tratamentos 1 e 3 (60ºC). Também, não houve diferenças significativas para o tratamento 1, em comparação com o tratamento 4.

- As propriedades mecânicas dos aglomerados produzidos com a resina poliuretana à base de mamona, quando comparadas com os valores médios das propriedades dos aglomerados produzidos com a resina à base de uréia-formaldeído, apresentaram valores

superiores. Apenas o módulo de elasticidade apresentou valores próximos param ambas as chapas. Os valores de inchamento e absorção de água foram superiores nos aglomerados produzidos com a resina à base de uréia-formol, o que indica maior estabilidade dimensional nos aglomerados produzidos com a resina poliuretana à base de mamona.

Os painéis de compensado e aglomerado, objeto deste estudo, apresentaram resultados consistentes e positivos. Mesmo quando foram obtidos valores inferiores entre os tratamentos, em algumas propriedades, estes valores atenderam às exigências normativas ou apresentaram equivalência e/ou superioridade a valores encontrados na literatura, para painéis produzidos com características diversas e com resinas tradicionais.

É importante considerar que, na fabricação dos compensados e aglomerados com a resina poliuretana à base de mamona, a temperatura de prensagem foi 60ºC e 90ºC. Isto corresponde a uma significante redução no consumo de energia, uma vez que, a cura das resinas uréia-formaldeído e fenol-formaldeído, são processadas à temperatura de 130 a 150ºC.

Com base nisto, pode-se afirmar que a resina poliuretana à base de mamona é uma alternativa promissora na fabricação de painéis compensados e aglomerados.

Com base nas conclusões recomenda-se:

- Testar outros níveis para os fatores examinados, tais como, tempo de prensagem e pressão específica.

- Estudos de compensados com diferentes números de lâminas, que aumentará a quantidade de resina por chapa, para avaliação da estabilidade dimensional.

- Estudar a produção de compensados com a resina poliuretana à base de mamona com diferentes espessuras de lâminas.
- Caracterizar LVL produzido com a resina à base de mamona.

- Avaliar a resina poliuretana à base de mamona na produção de compensados e aglomerados com diferentes espécies de *Eucalyptus* e *Pinus*.

- Estudar diferentes teores da resina em chapas de partículas.

- Avaliar a influência da razão de compactação em chapas de partículas.

- Estudos direcionados à manufatura de chapas de partículas com aplicação estrutural, tipo OSB, com a resina poliuretana à base de mamona.

- Analisar a influência da parafina, em vários teores, nas propriedades mecânicas de chapas aglomeradas, com a referida resina.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBA QUÍMICA. *Boletim técnico cascophen HL 2080*: resina fenólica para colagens a prova d'água. Emissão A, Ver.5, 2001.

_____. *Boletim técnico cascamite PL 2040*. São Paulo, 1999. 5p.

ALMEIDA, R.R. *Potencial da madeira de clones do híbrido Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla para a produção de lâminas e manufatura de painéis compensados*. Piracicaba, 2002. 79p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Universidade de São Paulo.

ANDRADE, M. Informações técnicas sobre resinas de aplicações em madeira. *Boletim Técnico da ALBA QUÍMICA PB2346*. 2002.

ARCHER, L.B. A fabricação de bons compensados. *Anuário Brasileiro de Economia Florestal*. v.1, n.1, p.113 – 121, 1948.

ARAUJO, L.C.R. *Caracterização química e mecânica de poliuretanas elastoméricas baseadas em materiais oleoquímicos*. São Carlos, 1992. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Física e Química de São Carlos. Universidade de São Paulo.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE. ABIMCE. *Estudo Setorial*. 2001. http:www.abimci.com.br (20 dez. 2004).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9484 - Compensado:* determinação do teor de umidade - método de ensaio. ABNT. Rio de Janeiro. 3p. 1986.

_____. *NBR 9485 - Compensado:* determinação da massa específica aparente - método de ensaio. ABNT. Rio de Janeiro. 3p.1986.

_____. *NBR 9486 - Chapas de madeira compensada:* determinação da absorção de água - método de ensaio. ABNT. Rio de Janeiro. 3p.1986.

_____. *NBR 9488 - Amostragem de compensado para ensaio*. ABNT. Rio de Janeiro. 3p.1986.

_____. *NBR 9489 - Condicionamento de corpos de prova de compensados para ensaios*. ABNT. Rio de Janeiro. 3p.1986.

_____. *NBR 9490 - Lâminas e compensados - terminologia*. ABNT. Rio de Janeiro. 9p.1986.

_____. *NBR 9531 - Compensado:* classificação. ABNT. Rio de Janeiro. 3p. 1986.

_____. *NBR 9532 - Compensado:* especificação. ABNT. Rio de Janeiro. 3p. 1986.

_____. *NBR 9533 - Compensado:* determinação da resistência à flexão estática - método de ensaio. ABNT. Rio de Janeiro. 3p. 1986.

_____. *NBR 9534 - Compensado:* determinação da resistência da colagem ao esforço de cisalhamento - método de ensaio. ABNT. Rio de Janeiro. 4p. 1986.

_____. *NBR 9535 - Compensado:* determinação do inchamento - método de ensaio. ABNT. Rio de Janeiro. 3p. 1986.

_____. *NBR 14810 - Chapa de madeira aglomerada.* Parte 1: terminologia. ABNT. Rio de Janeiro. 5p. 2002.

_____. *NBR 14810 - Chapa de madeira aglomerada.* Parte 2: requisitos. ABNT. Rio de Janeiro. 4p. 2002.

_____. *NBR 14810 - Chapa de madeira aglomerada.* Parte 3: métodos de ensaio. ABNT. Rio de Janeiro. 27p. 2002.

_____. *NBR 7190 - Projeto de estruturas de madeira*. Rio de Janeiro, ABNT, 1997. 107p.

AZAMBUJA, M.A. *Avaliação do adesivo poliuretano à base de mamona para fabricação de madeira laminada colada (MLC).* São Carlos, 2002. 115p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

BARROS NETO, B.; SCARMINO, I. S.; BRUNS, R. E. *Como fazer experimentos*: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria. Campinas, Editora da UNICAMP, 2002. 401p.

BODIG, J.; JAYNE, B.A. *Mechanics of wood and wood composites:* characteristics of wood composites. New York. Van Nostrand Reinhold Company. 47p. 1982.

BORTOLETTO JR., G. Produção de compensados com 11 espécies do gênero *Eucalyptus*, avaliação das suas propriedades físico-mecânicas e indicações para utilização. *Scientia forestalis*. n.63, p.65-78, jun. 2003.

BRASIL, A. A. *As exportações brasileiras de painéis de madeira.* Curitiba, 2002. 74p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Paraná.

CHOW, S. *Lathe-check Influence on Plywood Shear Strength.* Can. For. Serv. Inf. Rep. VP-x - 122p, 1974.

CLARO NETO, S. *Caracterizações físico-químicas de um poliuretano derivado de óleo de mamona utilizado para implantes ósseos*. São Carlos, 1997. 127p. Tese (Doutorado) - Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo.

COSTA NETO, P. L. O. *Estatística.* São Paulo, Edgar Blücher. 264p. 1977.

DIAS, F. M.; NASCIMENTO, M. F.; ROCCO LAHR, F. A. *Estudo sobre o potencial de madeira alternativa para produção de chapas de partículas*. In: SICEM, 2002, São Carlos.

EUROPEAN STANDARD. *NP/EN 314 - 2* - Contraplacado: qualidade de colagem, Parte 2: Requisitos. Norma portuguesa. Instituto Português da Qualidade. 10p. 2001.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. *Eucalyptus for planting.* Rome, FAO. p.503, 1981.

_____. *FAO Statistical Database*. 2004. http://www.fao.org/forestry/site/22052/en (14 maio 2004).

_____. *FAO Statistical Database*. 2004. http://www.fao.org/forestry (12 fev. 2005).

FORTES, F. J. P. *Versáteis aglomerados*. 2005. 3p. http://www.aksonobel-ti.com.br/artigos/aglomerado/aglomerado.htm (22 maio 2005).

FOREST PRODUCTS LABORATORY. *Particleboard.* U.S. Department of Agriculture. Forest Service. p.72. 1974.

FRANKLIN ADHESIVES. *Trinta princípios da colagem de madeira.* 2003. 5p. http:www.franklinadhesives.com. (10 maio).

GONÇALVES, M.T.T. Processamento da madeira. In: CASTRO, E.M. Processos de fabricação de chapas. 1.ed. Bauru, 2000. Cap. 7, p.213-36.

HIGA, A.R. Produção de sementes geneticamente melhoradas. *Revista da Madeira.* p.24–33. 2002. Edição especial. Dez.

HOEKSTRA, J.; FRITZIUS, U.W. *Reology of adhesives:* in adhesion and adhesives. New York, Elsevier Publishing Company. 1951.

HOUWINK, R.; SALOMON, G. *Adhesion and adhesives*. 2.ed. New York, Elsevier Publishing Company. 1965.

INTERAMNENSE, M.T. Curitiba/PR. 81 pg. Utilização das madeiras de *Eucalyptus cloeziana* (F. Muell), *Eucalyptus maculata* (HOOK) e *Eucalyptus punctata* DC *var. punctata* para produção de painéis compensados. Curitiba, 1998. 81p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná.

IWAKIRI, S. Painéis de Madeira. *Fundação de pesquisas Florestais* - FUPEF Paraná, Universidade Federal do Paraná, n.01/98. 1.ed. 1998.

IWAKIRI, S. Painéis de Madeira: características tecnológicas e aplicações. *Revista da madeira.* 2003. Edição especial. Maio.

JANKOWSKY, I.P. Manufatura de painéis compensados com madeira de *Eucalyptus spp*: resultados preliminares. Piracicaba. ESALQ. *Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais.* n.82, 4p. 1979.

JANKOWSKY, I.P. Efeito da quantidade de adesivo e do tempo de montagem na qualidade do painel compensado de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. *Boletim Informativo Projeto Pinheiros Tropicais*. v.2, n.11, p.46–79, jun. 1982.

JANKOWSKY, I.P. Manufatura de painéis compensados com madeira de *Eucalyptus spp:* caracterização de diversas espécies. *Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais.* p.821–824, 1983.

JESUS, J.M.H. *Estudo do adesivo poliuretano à base de mamona em madeira laminada colada (MLC).* São Carlos, 2000. 106p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

KEINERT JR., S. Produção de compensados. *Revista da Madeira*, n.24. p.42-45. 1984.

_____.; ALBERTO, M.M. Influência de diversos tempos e temperaturas de prensagem em compensados fenólicos de *Pinus taeda* – Efeito sobre a estabilidade dimensional. In: CONGRESSO FLORESTAL E DO MEIO AMBIENTE DO PARANÁ, 3. *Anais*. p.359-368, 1991.

KOLLMANN, F.P.; CÔTÉ, W.A. *Principles of wood science and technology*. v.1. Solid Wood. Reprint. Berlin, Heidelberg, New York, Tokio. Springer-Verlag: 1968 - 1984.
_____.; KUENZI, E.W.; STAMM, A.J. *Principles of wood science and technology:* Wood based materials. New York. Springer-Verlag. 1975. v.2, 703p.

MACEDO, A.R.P.; ROQUE, C.A.L. Painéis de madeira. *Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social.* Relatório Setorial. n.6, p. 117– 132, 1997. http:www.bndes.gov.br (09 maio 2002).

MADEPAN. Boletim técnio Duratex. 2003. http:www.duratex.com.br (15 junho 2003).

MALONEY, T.M. *Modern particleboard & dry-process fiberboard manufacturing.* California, Miller Freeman Publications. 672p. 1977.

MALONEY, T.M. The family of wood composite materials. *Forest Products Journal.* v.46, n.2, p. 19 – 26, 1996.

MANTILLA CARRASCO, E.V. *Ligações estruturais de madeira por adesivos.* São Carlos, 1984. 2v. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

MEDINA, J. C. *Efeito da temperatura de aquecimento nas lâminas por desenrolamento e sobre a qualidade de colagem de compensados fenólicos de Pinus elliottii Eng.* Curitiba, 1986. Dissertação (Mestrado) – Setor de Ciências agrárias, Universidade Federal do Paraná.

MOSLEMI, A.A. *Particleboard*. Illinois, Southern Illinois University Press. 1974.

NASCIMENTO, M.F. *CPH – Chapas de Partículas Homogêneas:* madeiras do nordeste do Brasil. São Carlos, 2003. 117p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

NOCK, H.P.; RICHTER, H.G. *Adesão e adesivos.* Curitiba. Universidade Federal do Paraná, 93f. 1978.

OLIN, H.W. *Wood*. In: CONSTRUCTION: PRINCIPLES, MATERIALS & METHODS. Ed. Van Nostrand Reinhold, New York, 1990. p.201- 45.

OLIVEIRA, J.T.; FREITAS, A.R. *Painéis à base de madeira.* Boletim técnico BT/PCC/149. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. EPUSP. 1995. 44p.

OLMOS, M.A.C. *Equipamento e processamento de fabricação de chapas aglomeradas a partir de resíduos de madeira.* São Carlos, 1992. 114p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

PEREYRA, O. *Avaliação de madeira de Eucalyptus dunnii (Maid) na manufatura de painéis compensados.* Piracicaba, 1994. 87p. Dissertação (Mestrado) – Escola superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

PETERSON, R.W. *Wood adhesives*. Otawa, Forest Products Research Branch, n.1055. 1964.

PIO, N.S. *Avaliação da madeira de Eucalyptus scabra (Dum-Cours) e Eucalyptus robusta (Smith) na produção de painéis compensados.* Curitiba, 1996. 101p. Dissertação (Mestrado) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

PIZZI, A. *Wood adhesives:* chemistry and technology. Marcel Dekker, Inc. New York. 1983. Cap.1. p.7– 57.

RECH, C. A alternativa do Pinus no Brasil. *Revista da Madeira* /Editorial/. p.4. 2002. Edição especial. Dez.

REINHART, F.W.; CALLOMON, I.G. *Survey of adhesion and adhesives*. Wade technical report 58-540. 1959.

REVISTA DA MADEIRA. *No eucalipto a opção de futuro*. n.31. p.36–39. 1997.

_____. *Espécies de eucalipto.* 2001. Edição especial. Set.

ROCCO LAHR, F.A. *Considerações a respeito da variabilidade de propriedades de resistência e elasticidade da madeira.* São Carlos, 1990. 109p.Tese (Livre Docência) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

SALES, A. *Proposição de classes de resistência para madeira*. São Carlos, 1993. 223p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

SAMLAIC, J. Os atuais problemas e as possibilidades dos adesivos para madeira. *Revista da Madeira.* n.374, p.7-10. 1983.

SANTANA, M.A.E.; COPPENS, H.A.; PASTORE Jr., F.; NAKAMURA, R.M. Adesivo de tanino-formaldeído para fabricação de compensado e aglomerado para uso interior e exterior. *Ministério da agricultura, Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal.* Brasília, n.2. 1979.

SELBO, M.L. *Adhesives bonding of wood.* Was., DC. FPL – FS – USDA, Technical Bulletin, n.1512, aug. 1975.

SILVA, S. A. M.; GONÇALVES, R. Chapas produzidas com fibras de madeira e adesivo poliuretano à base de óleo de mamona. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 8. Uberlândia, 2002. *Anais.* Uberlãndia, 2002. 9p.

SKEIST, I. *Handbook of adhesives*. New York, Reinhold Publishing. 1962.

STAMATO, G.C. *Resistência ao embutimento da madeira compensada*. São Carlos, 1998. 135p. Dissertação (Mestrado) - Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

STECK, G. *Wood-based panels*: plywood. Timber Engineering. STEP 1. A10/1-A10/9. 1995.

SUBRAMANIAN. Chemical of adhesion. The chemistry of solid wood. *American Chemical Society*. Washington DC. 1984. p. 323-348. 1984.

TADASHI, W.L. *Painéis derivados de madeira*: laminação e produção de painéis de compensados. PADC - STI - MIC. 1988.

TOMASELLI, I. Tendências de mudanças na indústria de painéis. *Revista da madeira.* p.36-40. 2000.

_____. A indústria de painéis compensados no Brasil e no mundo: tendências de mudanças do perfil de produção e usos. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE PRODUTOS SÓLIDOS DE MADEIRA DE ALTA TECNOLOGIA; ENCONTRO SOBRE TECNOLOGIAS APROPRIADAS DE DESDOBRO, SECAGEM E UTILIZAÇÃO DE MADEIRA DE EUCALIPTO, 1., Belo Horizonte, 1998. *Anais.* Belo Horizonte. 1998. p. 55 – 64.

TSOUMIS, G. *Science and technology of wood:* structure, properties and utilization. New York: Chapman & Hall. 1991. 494p.

VICK, C. B. Adhesive bonding of wood materials. Wood handbook – Wood as an engineering material. Gen. Tech. Rep. FPL – GTR – 113. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture. Forest Service. *Forest Products Laboratory*. Chap.9. 1999. 463p.

WATAI, L.T. Painéis derivados da madeira. *Boletim Associação Brasileira de Preservadores de Madeira*. São Paulo. 1987. n.52.

YOUNGQUIST, J. A. Wood-based composites and panel products. Wood handbook – Wood as an engineering material. Gen. Tech. Rep. FPL – GTR – 113. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture. Forest Service. *Forest Products Laboratory*. 1999. 463p.

ZUGMAN, I.C. Estrutura das indústrias e comércio de madeira compensada e laminada no Brasil e no mundo. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE PRODUTOS SÓLIDOS DE MADEIRA DE ALTA TECNOLOGIA, 1.; ENCONTRO SOBRE TECNOLOGIAS APROPRIADAS DE DESDOBRO, SECAGEM E UTILIZAÇÃO DE MADEIRA DE EUCALIPTO, 1., Belo Horizonte, 1998. *Anais.* Belo Horizonte. 1998. p.49–54.

ANEXO I

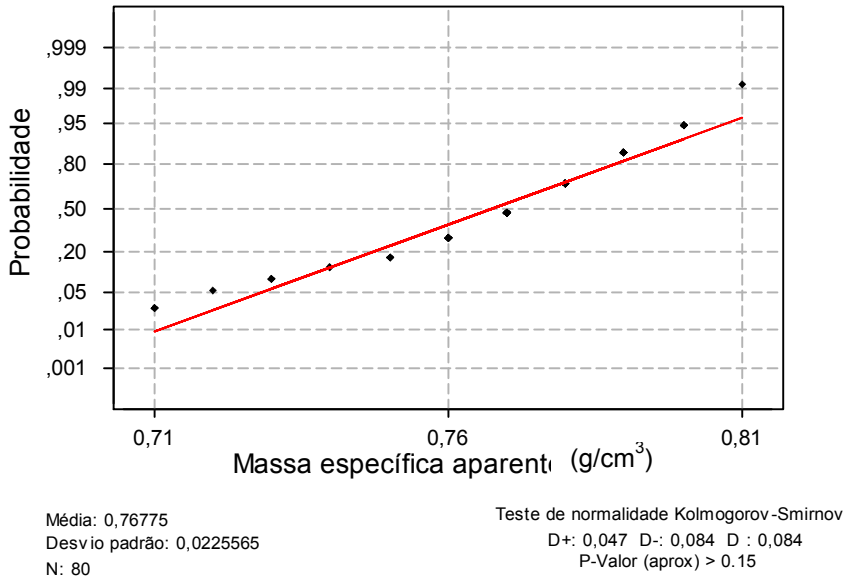


Figura 20 - Teste de normalidade para a massa específica aparente do compensado.

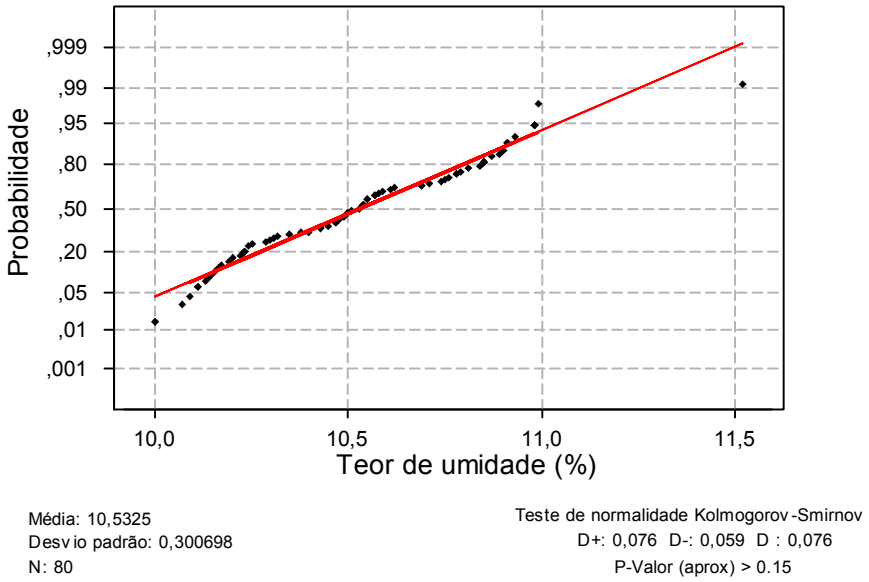


Figura 21 - Teste de normalidade para o teor de umidade do compensado.

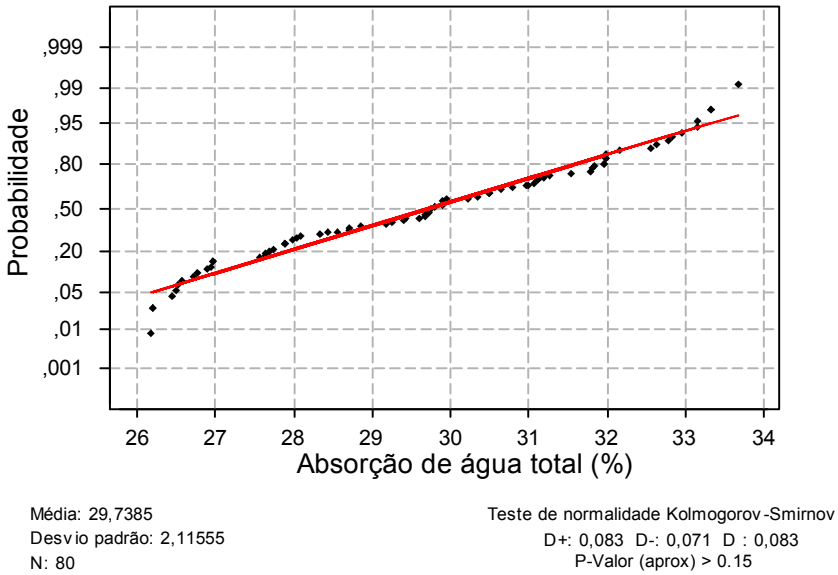


Figura 22 - Teste de normalidade para a absorção de água total do compensado.

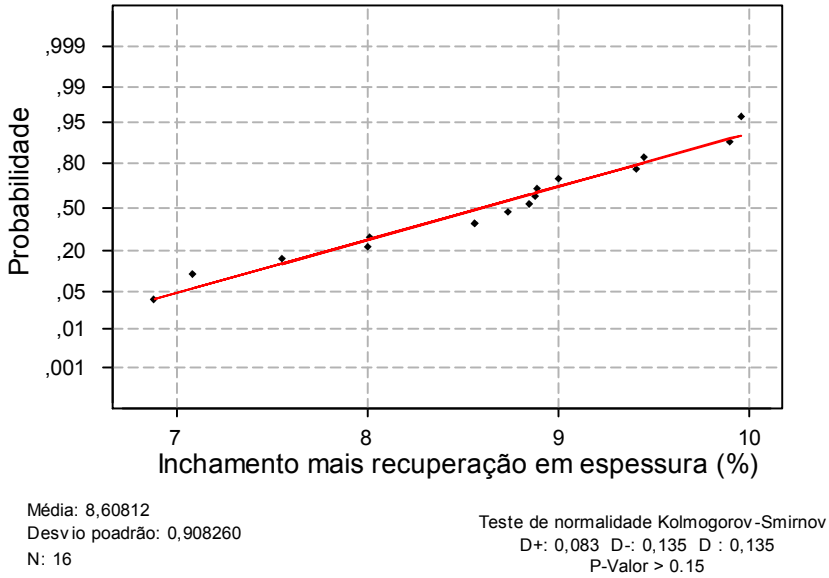


Figura 23 - Teste de normalidade para o inchamento mais recuperação em espessura do compensado.

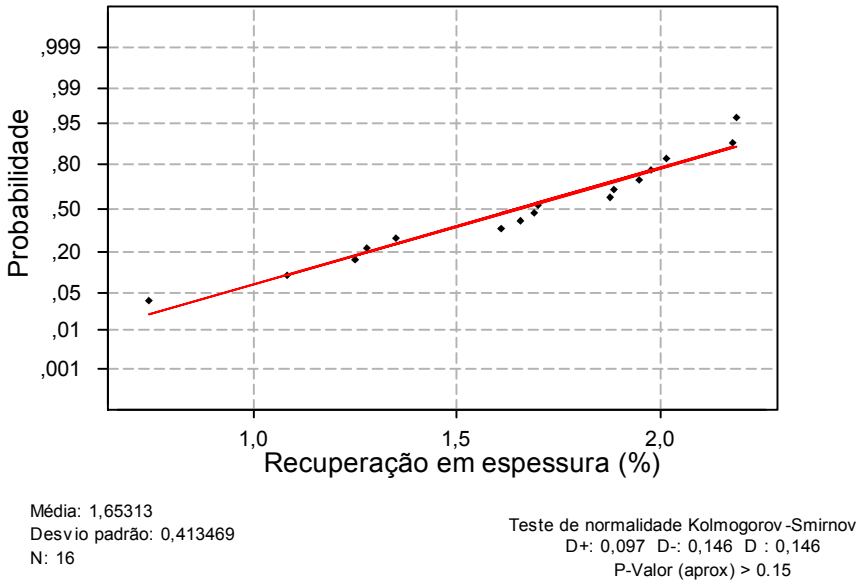


Figura 24 - Teste de normalidade para a recuperação em espessura do compensado.

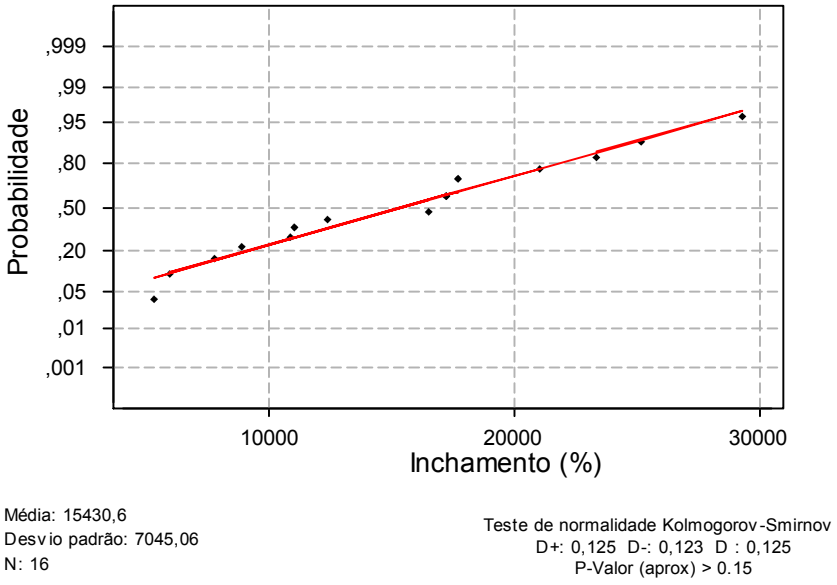


Figura 25 - Teste de normalidade para o inchamento do compensado.

No gráfico, I=4,994√(inchamento), onde I é o inchamento sem transformação.

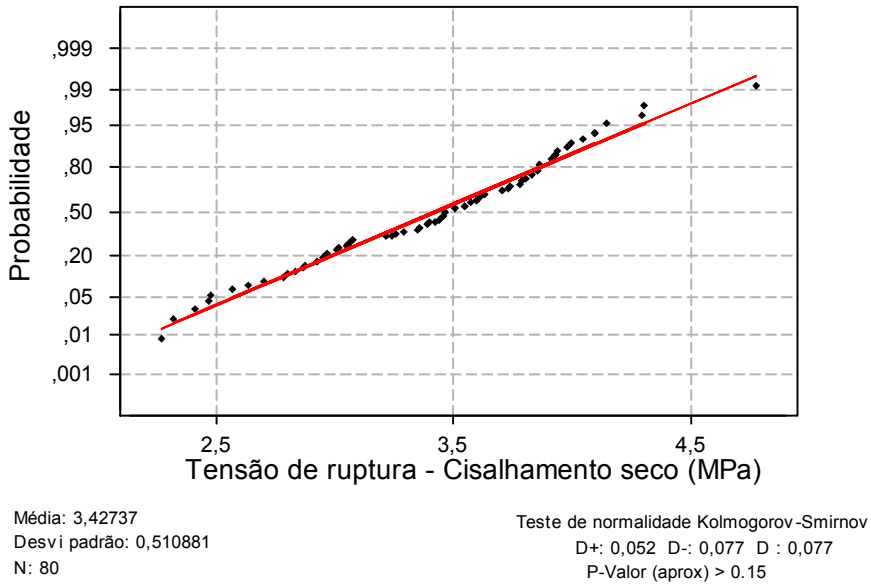


Figura 26 - Teste de normalidade da tensão de ruptura, no ensaio de resistência da colagem ao esforço de cisalhamento - ensaio seco, do compensado.

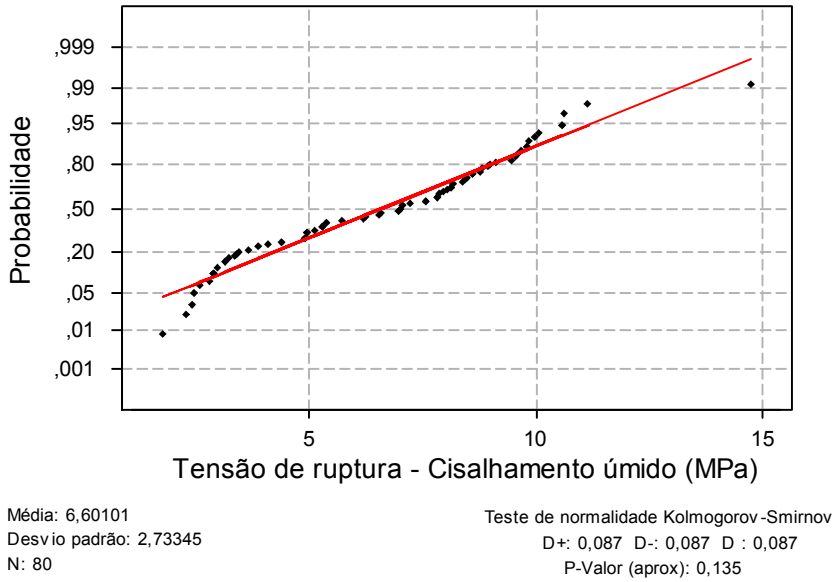


Figura 27 - Teste de normalidade da tensão de ruptura, no ensaio de resistência da colagem ao esforço de cisalhamento - ensaio úmido, do compensado.

No gráfico, TR=√(tensão), onde TR corresponde a tensão de ruptura sem a transformação.

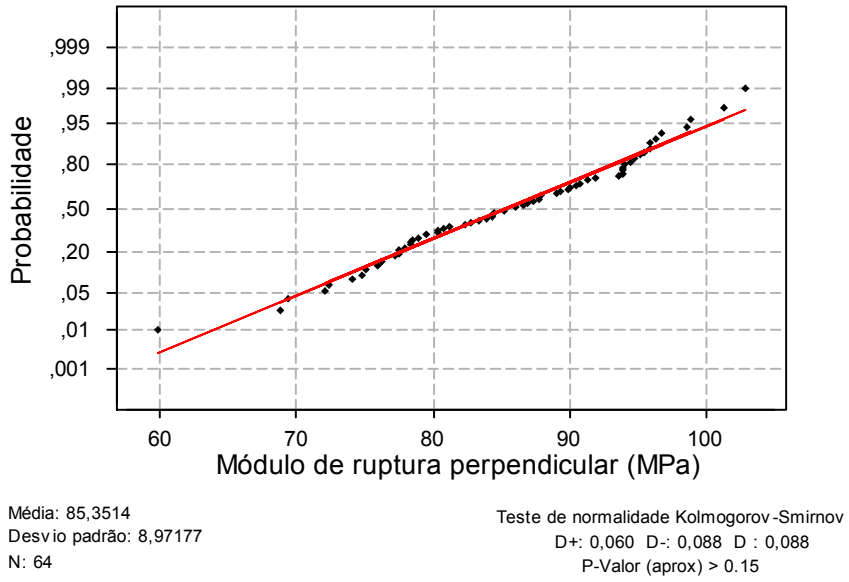


Figura 28 - Teste de normalidade do MOR paralelo, na flexão estática do compensado.

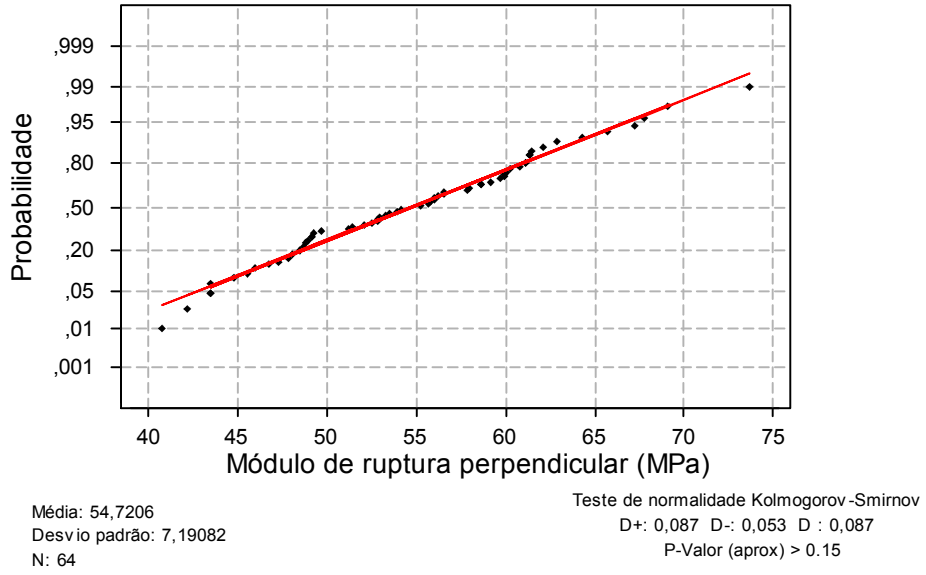


Figura 29 - Teste de normalidade do MOR paralelo, na flexão estática do compensado.

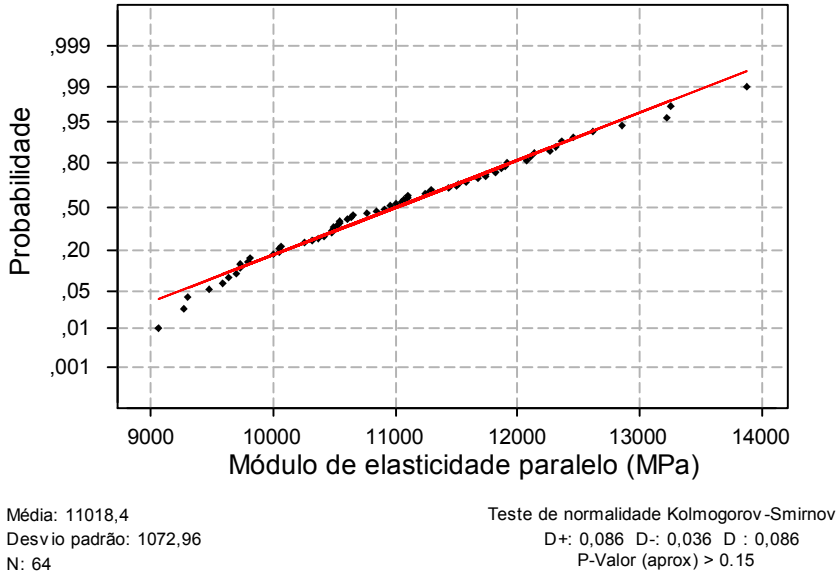


Figura 30 - Teste de normalidade do MOE paralelo, na flexão estática do compensado.

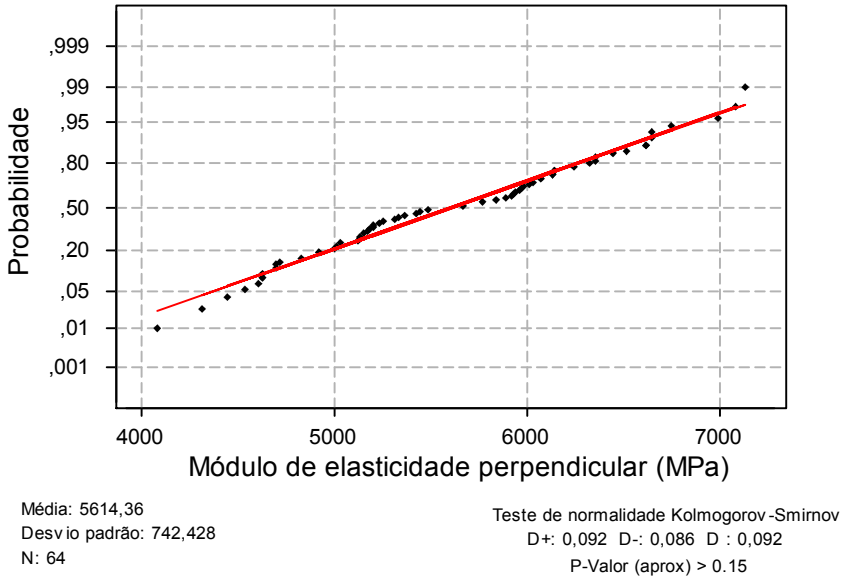


Figura 31 - Teste de normalidade do MOE perpendicular, na flexão estática do compensado.

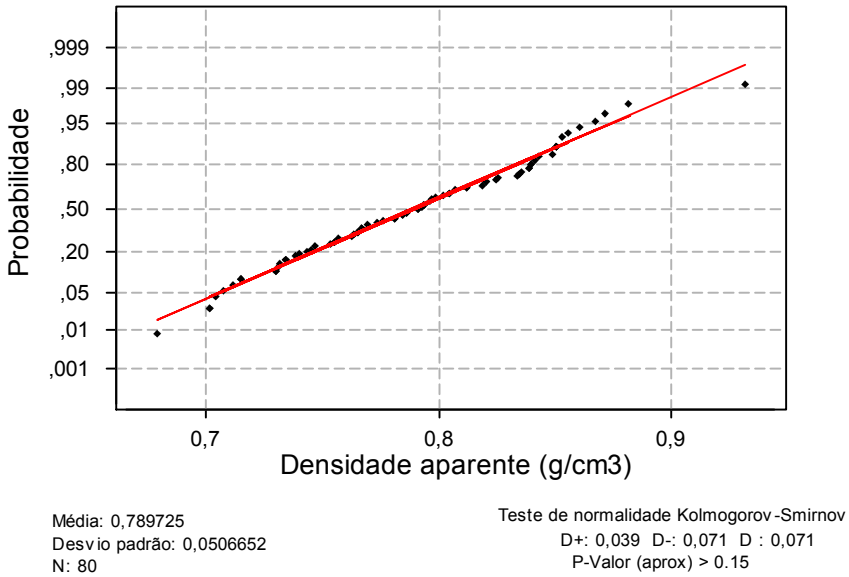


Figura 32 - Teste de normalidade para a densidade aparente dos aglomerados.

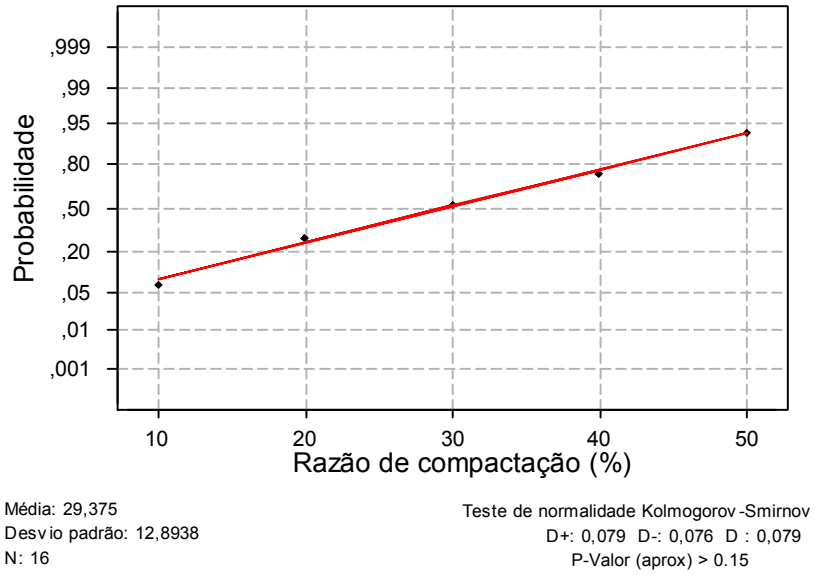
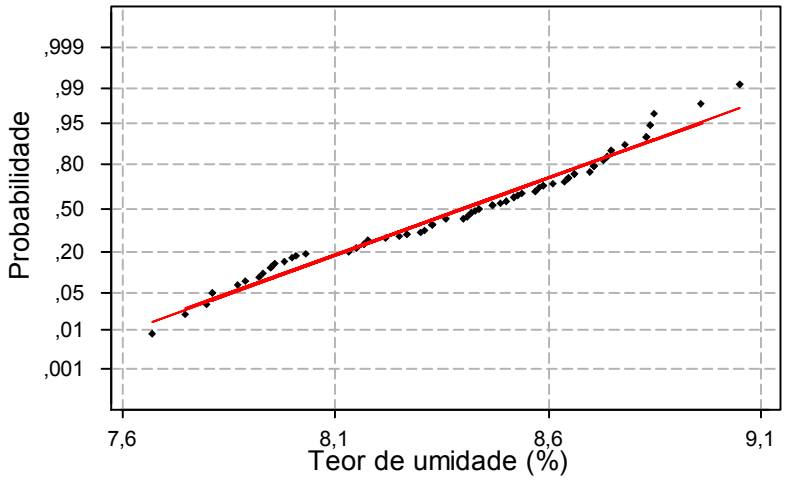


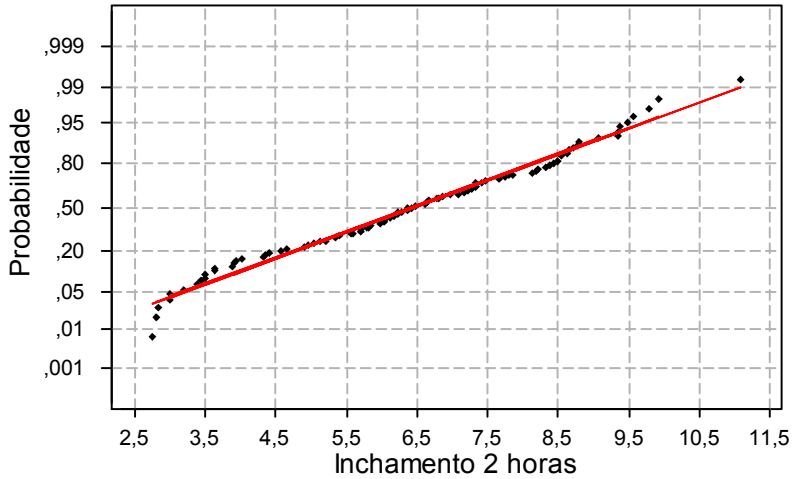
Figura 33 - Teste de normalidade para a razão de compactação dos aglomerados.



Média: 8,403
Desvio padrão: 0,326645
N: 80

Teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov
D+: 0,073 D-: 0,071 D : 0,073
P-Valor (aprox) > 0.15

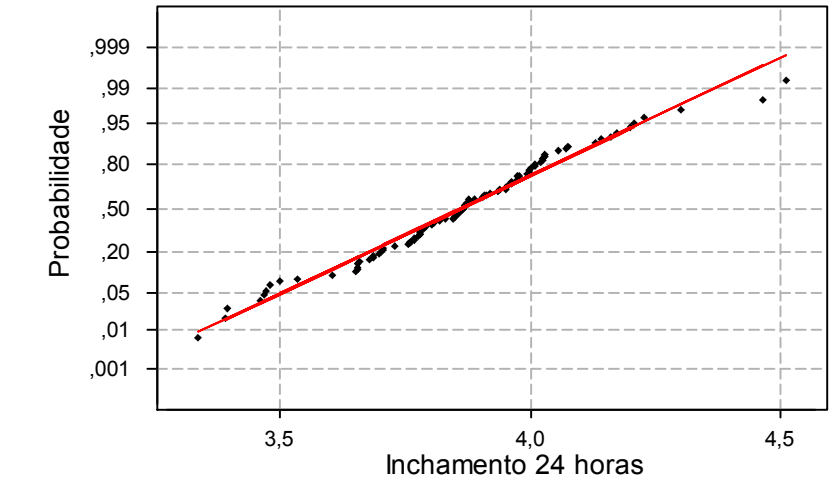
Figura 34 - Teste de normalidade para o teor de umidade dos aglomerados.



Média: 6,43583
Desvio padrão: 1,95704
N: 96

Teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov
D+: 0,057 D-: 0,059 D : 0,059
P-Valor (aprox) > 0.15

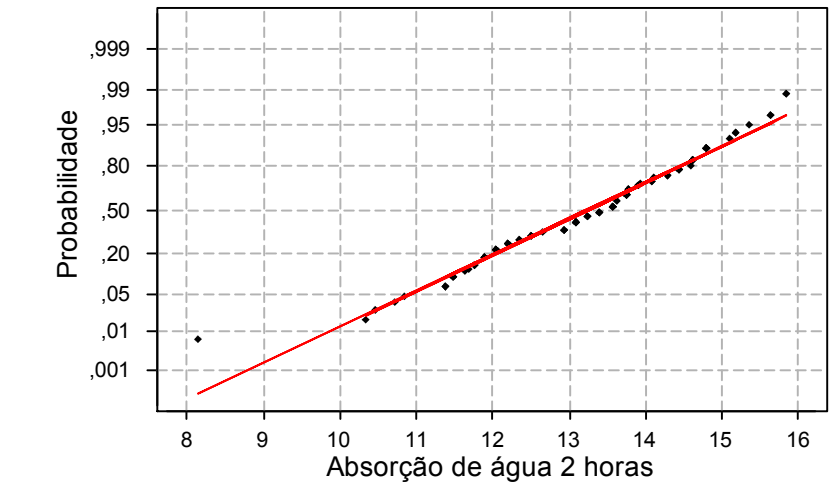
Figura 35 - Teste de normalidade para o inchamento 2 horas dos aglomerados.



Média: 3,86190
Desvio padrão: 0,214366
N: 96

Teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov
D+: 0,081 D-: 0,072 D : 0,081
P-Valor (aprox): 0,121

Figura 36 - Teste de normalidade para o inchamento 24 horas dos aglomerados. No gráfico, I24=0,449√(inchamento 24), onde I é o inchamento sem transformação.



Média: 13,2444
Desvio padrão: 1,39488
N: 96

Teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov
D+: 0,044 D-: 0,064 D : 0,064
P-Valor (aprox) > 0.15

Figura 37 - Teste de normalidade para a absorção de água 2 horas dos aglomerados.

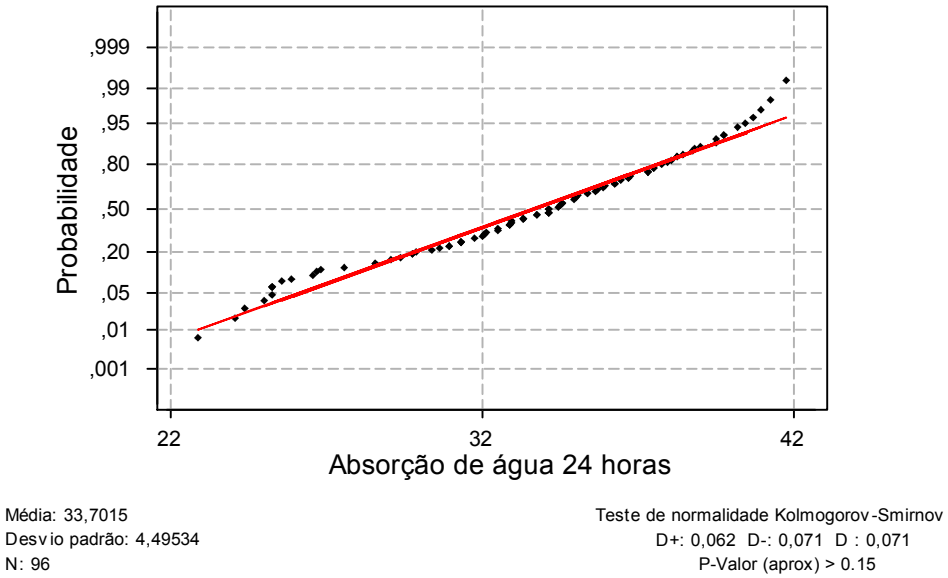


Figura 38 - Teste de normalidade para a absorção de água 24 horas dos aglomerados.

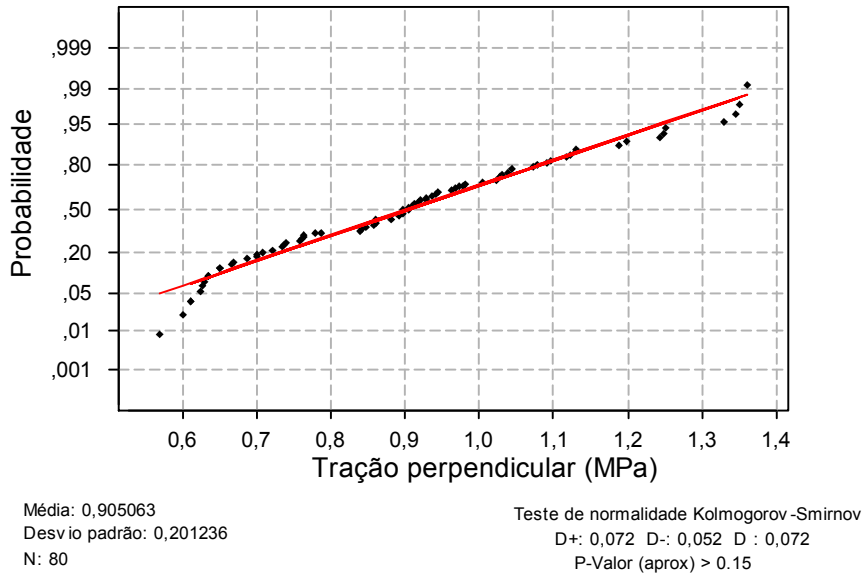


Figura 39 - Teste de normalidade para a tração perpendicular dos aglomerados.

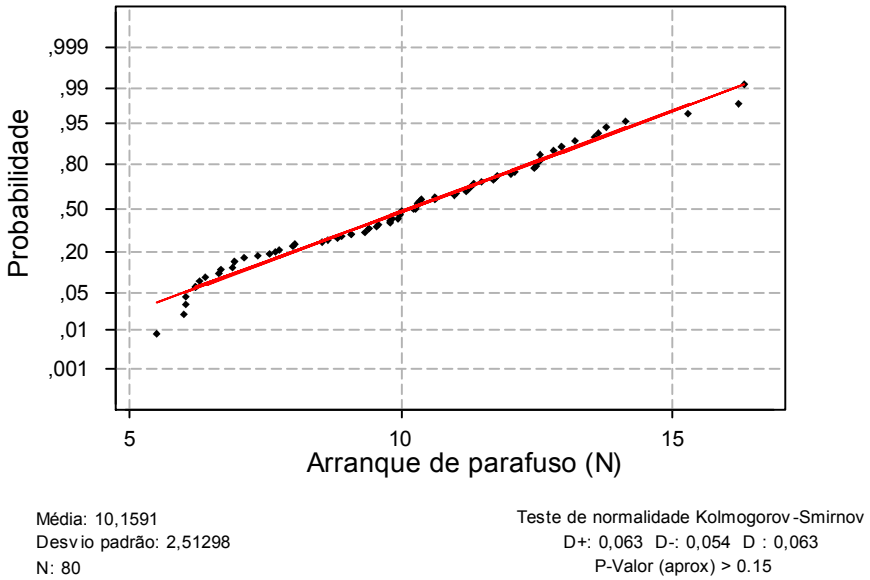


Figura 40 - Teste de normalidade para o arranque de parafuso dos aglomerados.

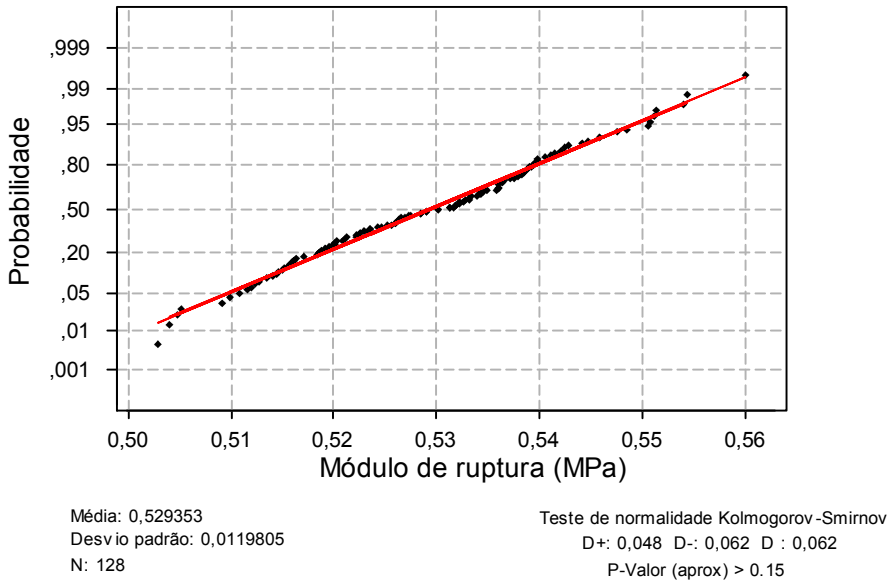


Figura 41 - Teste de normalidade para o MOR, na flexão estática, dos aglomerados. No gráfico, MOR=-0,225√(Módulo de ruptura), onde MOR é o módulo de ruptura sem transformação.

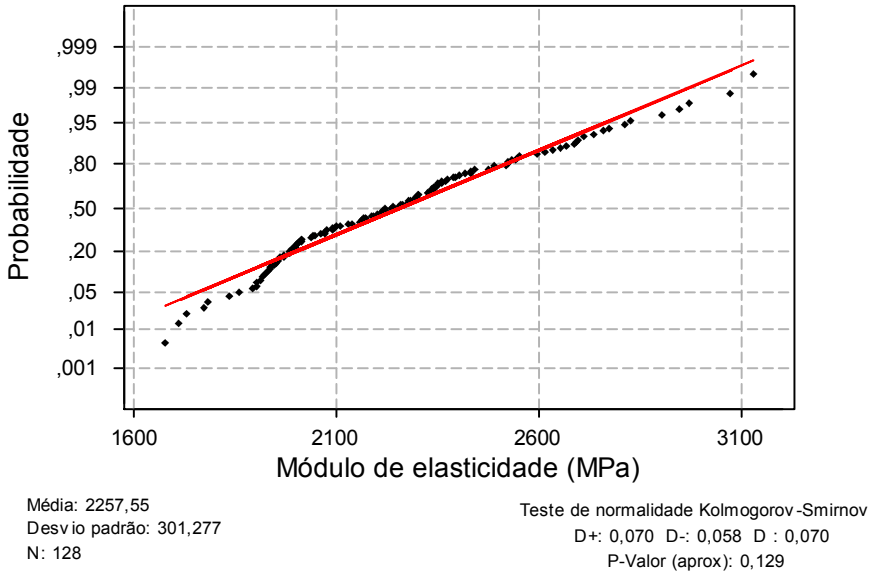


Figura 42 - Teste de normalidade para o MOE, na flexão estática, dos aglomerados.

ANEXO II

Tabela 68 - Análise de variância para a massa específica aparente dos compensados - primeira fase

Fonte da variação	G.L.	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	Prob.>F
Temperatura	1	0,000012	0,000012	0,03	0,870^{ns}
Resíduos	6	0,002575	0,000429		
Total	7	0,002588			

ns = não significativo a 95 % de probabilidade

Tabela 69 - Análise de variância para o teor de umidade dos compensados - primeira fase

Fonte da variação	G.L.	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	Prob.>F
Temperatura	1	0,02000	0,02000	2,18	0,190^{ns}
Resíduos	6	0,05500	0,00917		
Total	7	0,07500			

ns = não significativo a 95 % de probabilidade

Tabela 70 - Análise de variância para absorção total dos compensados - primeira fase

Fonte da variação	G.L.	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	Prob.>F
Temperatura	1	76,818	76,818	175,49	0,000*
Resíduos	6	2,626	0,438		
Total	7	79,444			

* significativo a 95 % de probabilidade

Tabela 71 - Análise de variância para inchamento dos compensados - primeira fase

Fonte da variação	G.L.	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	Prob.>F
Temperatura	1	0,039	0,039	0,13	0,736^{ns}
Resíduos	6	1,881	0,313		
Total	7	1,920			

ns = não significativo a 95 % de probabilidade

Tabela 72 - Análise de variância para recuperação em espessura dos compensados - primeira fase

Fonte da variação	G.L.	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	Prob.>F
Temperatura	1	0,10351	0,10351	55,58	0,000*
Resíduos	6	0,01118	0,00186		
Total	7	0,11469			

* significativo a 95 % de probabilidade

Tabela 73 - Análise de variância para MOR paralelo dos compensados - primeira fase

Fonte da variação	G.L.	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	Prob.>F
Temperatura	1	200	200	50	0,000*
Resíduos	6	24	4		
Total	7	224			

* significativo a 95 % de probabilidade

Tabela 74 - Análise de variância para MOR perpendicular dos compensados - primeira fase

Fonte da variação	G.L.	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	Prob.>F
Temperatura	1	91,13	91,13	9,81	0,020*
Resíduos	6	55,75	9,29		
Total	7	146,88			

* significativo a 95 % de probabilidade

Tabela 75 - Análise de variância para MOE paralelo dos compensados - primeira fase

Fonte da variação	G.L.	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	Prob.>F
Temperatura	1	1162050	1162050	2,31	0,179ns
Resíduos	6	3017509	502918		
Total	7	4179559			

ns = não significativo a 95 % de probabilidade

Tabela 76 - Análise de variância para MOE perpendicular dos compensados - primeira fase

Fonte da variação	G.L.	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	Prob.>F
Temperatura	1	577275	577275	5,74	0,054ns
Resíduos	6	603824	100637		
Total	7	1181099			

ns = não significativo a 95 % de probabilidade

Tabela 77 - Análise de variância para tensão de ruptura, no ensaio seco, dos compensados - primeira fase

Fonte da variação	G.L.	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	Prob.>F
Temperatura	1	1,2800	1,2800	80,84	0,000*
Resíduos	6	0,0950	0,0158		
Total	7	1,3750			

* significativo a 95 % de probabilidade

Tabela 78 - Análise de variância para tensão de ruptura, no ensaio úmido, dos compensados - primeira fase

Fonte da variação	G.L.	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	Prob.>F
Temperatura	1	0,4050	0,4050	12,46	0,000*
Resíduos	6	0,1950	0,0325		
Total	7	0,6000			

* significativo a 95 % de probabilidade

Tabela 79 - Análise de variância para a densidade aparente dos aglomerados - primeira fase

Fonte da variação	G.L.	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	Prob.>F
Espessura	1	0,000313	0,000313	1,27	0,054ns
Resíduos	6	0,001475	0,000246		
Total	7	0,001787			

ns = não significativo a 95 % de probabilidade

Tabela 80 - Análise de variância para o teor de umidade dos aglomerados - primeira fase

Fonte da variação	G.L.	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	Prob.>F
Espessura	1	0,1012	0,1012	7,84	0,051ns
Resíduos	6	0,0775	0,0129		
Total	7	0,1787			

ns = não significativo a 95 % de probabilidade

Tabela 81 - Análise de variância para absorção de água 2 horas dos aglomerados - primeira fase

Fonte da variação	G.L.	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	Prob.>F
Espessura	1	0,13	0,13	0,12	$0,051^{ns}$
Resíduos	6	6,42	1,07		
Total	7	6,55			

ns = não significativo a 95 % de probabilidade

Tabela 82 - Análise de variância para absorção de água 24 horas dos aglomerados - primeira fase

Fonte da variação	G.L.	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	Prob.>F
Espessura	1	0,73	0,73	0,07	$0,796^{ns}$
Resíduos	6	59,57	9,93		
Total	7	60,29			

ns = não significativo a 95 % de probabilidade

Tabela 83 - Análise de variância para inchamento 2 horas dos aglomerados - primeira fase

Fonte da variação	G.L.	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	Prob.>F
Espessura	1	0,076	0,076	0,15	$0,711^{ns}$
Resíduos	6	3,029	0,505		
Total	7	3,105			

ns = não significativo a 95 % de probabilidade

Tabela 84 - Análise de variância para inchamento 24 horas dos aglomerados - primeira fase

Fonte da variação	G.L.	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	Prob.>F
Espessura	1	1,92	1,92	0,64	$0,455^{ns}$
Resíduos	6	18,11	3,02		
Total	7	20,03			

ns = não significativo a 95 % de probabilidade

Tabela 85 - Análise de variância para inchamento 24 horas dos aglomerados - primeira fase

Fonte da variação	G.L.	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	Prob.>F
Espessura	1	1,92	1,92	0,64	0,455^{ns}
Resíduos	6	18,11	3,02		
Total	7	20,03			

ns = não significativo a 95 % de probabilidade

Tabela 86 - Análise de variância para MOR dos aglomerados - primeira fase

Fonte da variação	G.L.	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	Prob.>F
Espessura	1	0,047	0,047	0,06	0,815^{ns}
Resíduos	6	4,663	0,777		
Total	7	4,709			

ns = não significativo a 95 % de probabilidade

Tabela 87 - Análise de variância para MOE dos aglomerados - primeira fase

Fonte da variação	G.L.	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	Prob.>F
Espessura	1	12403	12403	0,51	0,503^{ns}
Resíduos	6	146536	24423		
Total	7	158939			

ns = não significativo a 95 % de probabilidade

Tabela 88 - Análise de variância para tração perpendicular dos aglomerados - primeira fase

Fonte da variação	G.L.	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	Prob.>F
Espessura	1	0,001800	0,001800	2,73	0,149^{ns}
Resíduos	6	0,003950	0,000658		
Total	7	0,005750			

ns = não significativo a 95 % de probabilidade

Tabela 89 - Análise de variância para a massa específica aparente dos compensados.

Fonte da variação	G.L.	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	Prob.>F
Temperatura	1	0,000911	0,000911	2,04	$0,158^{ns}$
Gramatura	1	0,000101	0,000101	0,23	$0,636^{ns}$
Interação	1	0,001711	0,001711	3,82	$0,054^{ns}$
Resíduos	76	0,034015	0,000448		
Total	79	0,036739			

ns = não significativo

Tabela 90 - Análise de variância para o teor de umidade dos compensados.

Fonte da variação	G.L.	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	Prob.>F
Temperatura	1	0,1479	0,1479	1,70	$0,196^{ns}$
Gramatura	1	0,3538	0,3538	4,07	$0,05^{ns}$
Interação	1	0,0274	0,0274	0,31	$0,577^{ns}$
Resíduos	76	6,6140	0,0870		
Total	79	7,1431			

ns = não significativo

Tabela 91 - Análise de variância para a absorção de água total dos compensados.

Fonte da variação	G.L.	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	Prob.>F
Temperatura	1	5,79	5,79	1,27	$0,263^{ns}$
Gramatura	1	0,41	0,41	0,09	$0,764^{ns}$
Interação	1	2,03	2,03	0,45	$0,506^{ns}$
Resíduos	76	345,34	4,54		
Total	79	353,57			

ns = não significativo

Tabela 92 - Análise de variância para o inchamento mais recuperação de espessura dos compensados.

Fonte da variação	G.L.	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	Prob.>F
Temperatura	1	0,466	0,466	0,77	0,396^{ns}
Gramatura	1	0,328	0,328	0,54	0,475^{ns}
Interação	1	4,358	4,358	7,24	0,020*
Resíduos	12	7,223	0,602		
Total	15	12,374			

ns = não significativo

* significativo a 95 % de probabilidade

Tabela 93 - Análise de variância para recuperação em espessura dos compensados.

Fonte da variação	G.L.	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	Prob.>F
Temperatura	1	0,238	0,238	1,30	0,276^{ns}
Gramatura		0,003	0,003	0,02	0,895^{ns}
Interação	1	0,131	0,131	0,72	0,413^{ns}
Resíduos	12	2,192	0,183		
Total	15	2,564			

n.s. = não significativo

Tabela 94 - Análise de variância para o inchamento dos compensados.

Fonte da variação	G.L.	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	Prob.>F
Temperatura	1	3137662	3137662	0,11	0,743^{ns}
Gramatura	1	74302012	74302012	2,67	0,128^{ns}
Interação	1	333214805	333214805	11,98	0,005*
Resíduos	12	333838252	333838252		
Total	15	744492732			

ns = não significativo

* significativo a 95 % de probabilidade

Tabela 95 - Análise de variância para a resistência da colagem ao cisalhamento no estado seco dos compensados.

Fonte da variação	G.L.	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	Prob.>F
Temperatura	1	2,961	2,961	13,71	0,000*
Gramatura	1	1,213	1,213	5,61	0,020*
Interação	1	0,029	0,029	0,14	0,714ns
Resíduos	76	16,416	0,216		
Total	79	20,619			

ns = não significativo

* significativo a 95 % de probabilidade

Tabela 96 - Análise de variância para a resistência da colagem ao cisalhamento no estado úmido dos compensados.

Fonte da variação	G.L.	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	Prob.>F
Temperatura	1	106,75	106,75	17,39	0,000*
Gramatura	1	1,20	1,20	0,19	0,660ns
Interação	1	15,72	15,72	2,56	0,114n.s.
Resíduos	76	466,61	6,14		
Total	79	590,27			

ns = não significativo

* significativo a 95 % de probabilidade

Tabela 97 - Análise de variância para o MOR na direção paralela às fibras dos compensados.

Fonte da variação	G.L.	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	Prob.>F
Temperatura	1	899,6	899,6	15,50	0,000ns
Gramatura	1	655,6	655,6	11,30	0,001ns
Interação	1	33,5	33,5	0,58	0,450*
Resíduos	60	3482,3	58,0		
Total	63	5071,0			

ns = não significativo

* significativo a 95 % de probabilidade

Tabela 98 - Análise de variância para o MOR na direção perpendicular às fibras dos compensados.

Fonte da variação	G.L.	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	Prob.> F
Temperatura	1	755,8	755,8	26,89	0,000*
Gramatura	1	721,1	721,1	25,65	0,000*
Interação	1	94,1	94,1	3,35	0,072ns
Resíduos	60	1686,6	28,1		
Total	63	3257,6			

ns = não significativo

* significativo a 95 % de probabilidade

Tabela 99 - Análise de variância para o MOE na direção paralela às fibras dos compensados.

Fonte da variação	G.L.	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	Prob.>F
Gramatura	1	10086976	10086976	11,27	0,001*
Temperatura	1	8551238	8551238	9,56	0,003*
Interação	1	199362	199362	0,22	0,639ns
Resíduos	60	53690165	894836		
Total	63	72527741			

ns = não significativo

* significativo a 95 % de probabilidade

Tabela 100 - Análise de variância para o MOE na direção perpendicular às fibras dos compensados.

Fonte da variação	G.L.	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	Prob.>F
Gramatura	1	8900526	8900526	24,59	0,000*
Temperatura	1	2806881	2806881	7,75	0,007*
Interação	1	1299885	1299885	3,59	0,063ns
Resíduos	76	21718260	361971		
Total	79	34725553			

ns = não significativo

* significativo a 95 % de probabilidade

Tabela 101 - Análise de variância para a densidade aparente dos aglomerados.

Fonte da variação	G.L.	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	Prob.>F
Temperatura	1	0,00055	0,00055	0,21	0,650^{ns}
Parafina	1	0,00000	0,00000	0,00	0,983^{ns}
Interação	1	0,00000	0,00000	0,00	0,969^{ns}
Resíduos	76	0,20223	0,00266		
Total	79	0,20279			

ns = não significativo

Tabela 102 - Análise de variância para a razão de compactação dos aglomerados.

Fonte da variação	G.L.	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	Prob.>F
Temperatura	1	0,000056	0,000056	0,07	0,791^{ns}
Parafina	1	0,000156	0,000156	020	0,659^{ns}
Interação	1	0,000156	0,000156	0,20	0,659^{ns}
Resíduos	12	0,009175	0,000765		
Total	15	0,009544			

ns = não significativo

Tabela 103 - Análise de variância para o teor de umidade dos aglomerados.

Fonte da variação	G.L.	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	Prob.>F
Temperatura	1	0,039	0,039	0,36	0,553^{ns}
Parafina	1	0,000	0,000	0,00	0,968^{ns}
Interação	1	0,104	0,104	0,95	0,333^{ns}
Resíduos	76	8,287	0,109		
Total	79	8,429			

ns = não significativo

Tabela 104 - Análise de variância para o inchamento 2 horas dos aglomerados.

Fonte da variação	G.L.	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	Prob.>F
Temperatura	1	119,80	119,80	85,67	0,000*
Parafina	1	113,49	113,49	81,16	0,000*
Interação	1	1,91	1,91	1,37	0,246ns
Resíduos	92	128,65	1,40		
Total	95	363,85			

ns = não significativo

* significativo a 95 % de probabilidade

Tabela 105 - Análise de variância para o inchamento 24 horas dos aglomerados.

Fonte da variação	G.L.	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	Prob.>F
Temperatura	1	0,2175	0,2175	6,13	0,015*
Parafina	1	0,7985	0,7985	22,50	0,000*
Interação	1	0,0842	0,0842	2,37	0,127ns
Resíduos	92	3,2652	0,0355		
Total	95	4,3655			

ns = não significativo

* significativo a 95 % de probabilidade

Tabela 106 - Análise de variância para a absorção de água 2 horas dos aglomerados.

Fonte da variação	G.L.	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	Prob.>F
Temperatura	1	43,82	43,82	32,48	0,000*
Parafina	1	16,87	16,87	12,50	0,001*
Interação	1	0,01	0,01	0,01	0,925ns
Resíduos	92	124,14	1,35		
Total	95	184,84			

ns = não significativo

* significativo a 95 % de probabilidade

Tabela 107 - Análise de variância para a absorção de água 24 horas dos aglomerados.

Fonte da variação	G.L.	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	Prob.>F
Temperatura	1	425,5	425,5	40,98	0,000*
Parafina	1	333,8	333,8	32,16	0,000*
Interação	1	205,4	205,4	19,79	0,000*
Resíduos	92	955,1	10,4		
Total	95	1919,8			

ns = não significativo

* significativo a 95 % de probabilidade

Tabela 108 - Análise de variância para a tração perpendicular dos aglomerados.

Fonte da variação	G.L.	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	Prob.>F
Temperatura	1	0,6880	0,6880	39,09	0,000*
Parafina	1	0,0636	0,0636	3,61	0,061ns
Interação	1	1,1099	1,1099	63,06	0,000*
Resíduos	92	1,3377	0,0176		
Total	95	3,1992			

ns = não significativo

* significativo a 95 % de probabilidade

Tabela 109 - Análise de variância para o arranque de parafuso dos aglomerados.

Fonte da variação	G.L.	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	Prob.>F
Temperatura	1	269,63	269,63	166,19	0,000*
Parafina	1	100,06	100,06	61,67	0,000*
Interação	1	5,89	5,89	3,63	0,060ns
Resíduos	76	123,30	1,62		
Total	79	498,89			

ns = não significativo

* significativo a 95 % de probabilidade

Tabela 110 - Análise de variância para o MOR dos aglomerados.

Fonte da variação	G.L.	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	Prob.>F
Temperatura	1	0,000269	0,000269	2,00	0,160^{ns}
Parafina	1	0,000373	0,000373	2,77	0,099^{ns}
Interação	1	0,000883	0,000883	6,56	0,012*
Resíduos	124	0,016703	0,000135		
Total	127	0,018228			

ns = não significativo

* significativo a 95 % de probabilidade

Tabela 111 - Análise de variância para o MOE dos aglomerados.

Fonte da variação	G.L.	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	Prob.>F
Parafina	1	4074	4074	0,05	0,819^{ns}
Temperatura	1	297629	297629	3,83	0,052*
Interação	1	1601786	1601786	20,64	0,000*
Resíduos	124	9624057	77613		
Total	127	11527546			

APÊNDICE

Materials Research, Vol. 7, No. 3, 413-420, 2004.

© 2004

Alternative Castor Oil-Based Polyurethane Adhesive Used in the Production of Plywood

Fabricio Moura Dias[a]*, *Francisco Antonio Rocco Lahr*[b]*

[a]*Materials Science and Engineering, University of São Paulo - USP, Av. Trabalhador Sãocarlense, 400, 13566-590 São Carlos - SP, Brazil*
[b]*Department of Structural Engineering, São Carlos School of Engineering - EESC, University of São Paulo - USP*

Received: September 11, 2003; Revised: May 3, 2004

Plywood is normally produced with urea-formaldehyde and/or phenol-formaldehyde adhesives. However, the former is considerably toxic and environmentally damaging, while the latter is expensive, thus motivating the search for alternative raw materials in plywood production. The castor oil-based polyurethane adhesive developed at the São Carlos Institute of Chemistry, University of São Paulo, is an environmentally friendly vegetal oil-based polymer that is harmless to humans. The wood species *Eucalyptus grandis* offers favorable properties for plywood the manufacture. The study reported on here involved the use of castor oil-based polyurethane adhesive to produce plywood with *Eucalyptus grandis* layers. The plywood's performance was evaluated based on the results of physical and mechanical tests recommended by the Brazilian code, ABNT. Tests results showed higher values than those reported in the literature and recommended by the ABNT, indicating that the castor oil-based polyurethane adhesive is a promising glue for the manufacture of plywood.

Keywords: *plywood, polyurethane adhesive based on castor oil, properties*

1. Introduction

The advantage of wood-based products is that the wood's properties can be improved through the application of science and technology. These products include wood panels, or plywood, whose consumption around the world and in Brazil has grown steadily.

These panels are produced with adhesives, and the ones available in Brazil, i.e., urea-formaldehyde and/or phenol-formaldehyde adhesives, involve negative factors such as high energy consumption due to the high temperatures required for curing (130 to 160 °C), the high cost of phenol, which is petroleum-based, and their toxicity for humans and the environment.

An alternative adhesive deriving from a natural and renewable source, castor oil-based polyurethane adhesive is classified as impermeable and non-aggressive to the environment and to humans, besides representing a Brazilian technology. This adhesive is cured at ambient temperature, but curing can be accelerated using temperatures of 60 to 90 °C, and it is believed that its large scale availability on the market will bring its price down to a very reasonable level.

The wood panel industry represents an important segment of the country's economy, not only because it generates revenue and jobs but also due to its increasing dynamism, particularly in the furniture and civil construction sectors. However, for this dynamism to continue, technological investments are required to expand and improve the production of panels.

Some of the practical factors the justify the preferential use of wood-based panels are the reliability of the material, stability of the pieces, possibility of producing pieces with dimensions not found in solid wood, use in modern and complex applications with low cost-efficiency ratio, and utilization of most of the log[1].

Wood-based panels are classified as wood-based layers, fiber and particle panels. The layered-based panel include plywood, which consists of thin layers of wood superposed orthogonally and glued together, their fibers laid in alternate directions.

*e-mail: fmdias@sc.usp.br, frocco@sc.usp.br

Today, the glues traditionally available on the market represent the most expensive components of these panels, and their toxicity poses health risks. These two factors *per se* justify the search for alternative adhesives of comparable quality and performance, based on raw materials deriving from natural and renewable sources. In this context, castor oil-based polyurethane adhesive possesses satisfactory properties[2]. This adhesive was developed at the Institute of Chemistry of São Carlos, of the University of São Paulo.

The purpose of this study, therefore, was to evaluate the performance of plywood produced with the wood species *Eucalyptus grandis* based on its physical and mechanical properties and the performance of the castor oil-based polyurethane adhesive, comparing the results with the properties of plywood reported in the literature.

2. Plywood

Plywood, as explained earlier, is produced by superposing and gluing together several layers of wood with their fibers crossed perpendicularly. This procedure, called cross lamination (Fig. 1), confers good rigidity, mechanical strength and dimensional stability on the product. Plywood can be made from either softwoods or hardwoods[3,4].

The layers in plywood are aligned according to a predetermined arrangement so as to obtain equivalence of its properties of stiffness and strength in the main directions of the board. Crossed lamination and gluing of plywood further capitalize on the wood's most desirable physical and mechanical properties[4].

Plywood has well-established applications in several market segments, such as furniture, boatbuilding, special weather-resistant packaging, musical instruments and sports equipment, and in civil construction. In the latter industry, it is applied in external walls, roof closures, flooring, wall panels, internal dividing walls, fronts, composite beams, truss connections, floor panels, concrete molds, arch-shaped roofs, etc.

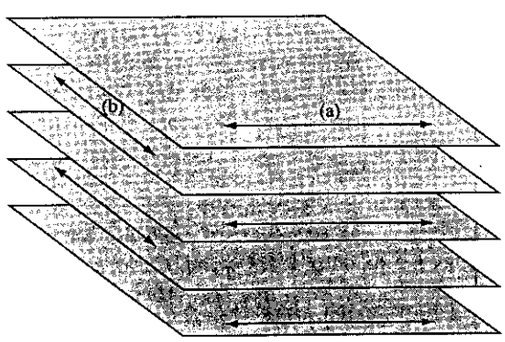


Figure 1. Position of layers in plywood. a) Direction perpendicular to the grain of the external layers; b) Direction parallel to the grain of the external layers. Source: Keinert Jr.[12].

2.1. Plywood specifications

The Brazilian code - ABNT - contains norms specifying the dimensions, tolerances and conditions to be followed for the classification of plywood, as listed below.

ABNT - NBR 9531 (1986)[5] standard: "Plywood - classification" qualifies boards according to the place they are used, based on three basic types: IR (interiors), IM (intermediates) and EX (exteriors).

IR plywood is produced with non-water resistant adhesive, and is applied in places away from water or high relative moisture content. The IM type plywood is destined for internal use, but in environments with high moisture content which may be subject to water splashes. EX plywood is destined for external use or in closed environments, where it is subjected to repeated wet and dry cycles or to the action of water.

ABNT - NBR 9532, (1986)[6] states: "Plywood - specifications" establishes the geometric characteristics, such as assembly, dimensions, shape, thickness and tolerances, as well as other conditions that must be adhered to for each type of board. According to this standard, plywood is divided into the following specifications:

- General use plywood – GER: plywood boards classified generically as IR.
- Mold for reinforced concrete – FOR: plywood boards classified generically as EX. This type of plywood should present a modulus of elasticity of at least 4000 N/mm^2.
- Decorative - DEC: plywood boards classified generically as IM.
- Industrial - IND: plywood boards classified generically as EX.
- Marine applications - NAV: plywood boards classified generically as EX. This type of plywood should present a modulus of elasticity of at least 6000 N/mm^2.
- Slatted - SAR: plywood boards classified generically as IR, whose internal portion consists of wood slats with a maximum width of 40 mm.

2.2. Plywood production

The description given below is based on Zugman[8], who describe the production stages of plywood.

Before they are cut in a laminator, the logs are debarked and placed in tanks containing steam or hot water to soften the wood and increase its plasticity, making it easier to obtain smoother and less breakable layers.

The wood layers are then produced by cutting, sawing or cutting on a rotating lathe. The next stage consists of

drying the layers to reduce their moisture to a preestablished content and produce a flat, flexible material. Drying is done very quickly (a few min) and the final moisture content is about 4 to 6%. The dry layers are stored in piles according to their width and class. They should be visually classified by type and size of defects, as well as by the number and characteristics of the grain of the various layers.

In small operations, the adhesive is applied with a brush, but large scale operations use roll spreaders. Another method often used is the curtain method, whereby a machine with a reservoir, having a pair of parallel steel blades with a slit between them mounted underneath the reservoir, spreads a thin curtain, or film, of adhesive over the surface of the layers.

Two important factors are directly correlated with the strength, density and quality of the end product, i.e., the amount of adhesive applied per area and its uniform distribution over the layers[7,8].

Immediately after the adhesive is applied on the layers, they should be assembled to form the plywood board, which is then pressed under a load. It is advisable to exert a slight initial pressure before applying the total load. If a heated press is used, its loading should be performed as quickly as possible to prevent the adhesive from drying out before the board is properly compressed[7,8]. Compression time depends basically on the temperature of the press and the type of adhesive used. For compression temperatures of 100 to 160 °C, compression should be limited to a few min. The gluing pressure by hot pressure may vary from 1.2 to 2.0 MPa.

2.3. Potential of the genus Eucalyptus for the manufacture of plywood

Approximately 70% of the wood used to produce plywood in Brazil comes from native forests and 30% from reforested *Pinus* spp. However, the stock of *Pinus* spp forests has shrunk and the enormous variability of the characteristics of native species makes their use as raw material difficult[10].

The search for new sources of raw materials for the production of plywood and the favorable characteristics of *Eucalyptus* spp wood are strong arguments in favor of research to identify the potential of new species of the genus, its hybrids and clones, the quality of the products derived from them, and the determination of alternative sources of wood.

One the most commonly used species of eucalyptus used in southern Brazil is the *E. grandis* grown in the state of São Paulo[10]. The genus *Eucalyptus* can be considered one of the most promising for producing alternative products to replace native species. Its wood can be used for various purposes, among them the production of panels.

Jankowsky[11] evaluated *Eucalyptus grandis* wood for the production of layers and plywood panels, concluding that this wood is technologically viable for use in the manufacture of plywood.

3. Adhesives

Adhesives are one of the main components in the production of wood-based panels.

Plywood is produced according to two main specifications: a) for indoor use, glued with urea-formaldehyde resin, which is employed chiefly in the furniture industry, and b) for outdoor use, glued with phenol-formaldehyde resin, employed in civil construction[9-12].

Urea-formaldehyde adhesives have a serious drawback, which is the emanation of formaldehyde fumes and its use is limited in countries with strict environmental control. Phenol-formaldehyde adhesive is produced from synthetic phenolic resins. One of its negative factors is the cost of phenol, whose raw material is petroleum. This adhesive required high curing temperatures that vary from 130 to 160 °C [13,14].

3.1. Alternative adhesive: castor oil-based polyurethane

In the early 1980's, the Department of Chemistry and Molecular Physics of São Carlos made an important national contribution through its studies on polyurethane resin-based adhesives. The researchers of the Analytical Chemistry and Polymer Technology Group developed a castor oil-based polyurethane resin that offers several advantages, such as handling at ambient temperature, strong resistance to water and UV rays, strong mechanical strength and the fact that it derives from a natural and renewable source easily found in most of the country[15].

The castor-oil plant *(Rícinos communis)* is a plant of the Euphorbiaceae family from which castor oil is extracted. This plant is known internationally as Castor-Oil Plant and in Brazil as Caturra[16].

Polyols and prepolymers with different characteristics can be synthesized from this natural and renewable source, which, when mixed, result in a polyurethane. Its competitiveness in relation to other polymers is basically tied to three factors: it derives from a natural and renewable raw material, its mechanical properties are superior to those of petroleum-derived polymers, and the cost of the diisocyanates in Brazil is reasonable[15].

Claro Neto[15] characterized the physical and mechanical properties of a castor oil-based polyurethane polymer. The study of the chemical properties aimed to characterize the functional organic groups present in the polyol/prepolymer components that react during preparation of the polyurethane. The castor oil-based polyurethane was developed for use in medical applications as a bone implant material.

To expand the application of this product, Jesus[2] and Azambuja[17] studied of the behavior of castor oil-based polyurethane adhesive for use in glued laminated timber (GLT) with reforested species of the genera *Eucalyptus* and *Pinus*. The adhesive's efficiency was evaluated based on mechanical

IFSC-USP SERVIÇO DE BIBLIOTECA E INFORMAÇÃO

tests of shearing strength parallel to the grain, tensile strength perpendicular and tensile strength parallel to the grain. The results reported by these authors demonstrated that castor oil-based polyurethane adhesive is a good alternative for the technological use of GLT.

4. Materials and Methods

4.1. Production of plywood boards

An experimental model of plywood was fabricated in the Wood and Timber Structures Laboratory of the Department of Structural Engineering, School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo.

The adhesive, made of the Institute of Chemistry of São Carlos of the University of São Carlos, which was applied with a brush, was castor oil-based polyurethane resin of the bicomponent type, B1640 polyol and A249 prepolymer, in a 2:1 ratio. The adhesive was applied in simple lines, with a layer of glue applied to the layers on only one of the surfaces. The gluing parameters are given in Table 1.

The plywood panels were manufactured with seven layers of the species Eucalytus grandis having a nominal thickness of 0.2 cm. Four panels were produced with a nominal thickness and area of 50 × 50 cm, from which the test specimens (14 for each test) were taken for characterization of their physical and mechanical properties.

The wood layers were supplied by the Wood based Panels and Peeling Laboratory, Department of Forest science, of the Superior School of Agriculture "Luiz de Queiroz", of the university of São Paulo. These layers were classified according to the Brazilian Code NBR 9531 (1986)[5], in the classes: N, B, C and D, from the best to the worst quality.

Plywood panels were manufactured with class C layers.

4.2. Experiments

The tests involved in the characterization of the plywood were: moisture content, specific gravity, modulus of elasticity (MOE) and modulus of rupture (MOR) obtained from the static bending test and glue-shear strength.

To identify the moisture content, NBR 9584 (1986)[18], each test specimen was weighed and then oven dried at 103 ± 2 °C to a constant mass. The moisture content was obtained through Eq. 1.

$$TU = \frac{Mu \quad Ms}{Ms} \cdot 100 \qquad (1)$$

where: TU = moisture content in %; M_u and M_s = the test specimen's moist and dry mass in g.

Equation 2 was used to obtain the specific gravity, NBR 9485 (1986)[19]. The nominal dimensions of these specimens were (100 × 50 × 14) mm.

$$\rho = \frac{m}{v} \qquad (2)$$

where: Mea = specific gravity in g/cm³; M = the specimen's mass in g; C, l, e = length, width and thickness of the specimen in cm.

For the static bending test, according to the NBR 9533 (1986)[20], the specimen is supported at both ends and a load is applied at mid-span (Fig. 2), using a chopper continuously at a constant velocity. The nominal dimensions of these specimens were: length of 400 mm; width of 70 mm and thickness of 14 mm.

The loading velocity was calculated using Eq. 3.

$$V = \frac{K.L^2}{6.e} \qquad (3)$$

where: K = 0.00005, fiber deformation rate; and V = Loading velocity in mm/s.

The loads and the corresponding vertical displacements were recorded (minimum of 12 readings) in order to determine the modulus of elasticity (MOE) based on Eq. 4, and the modulus of rupture (MOR) based on Eq. 5.

$$E_b = \frac{L.^3.(F_2 \quad F_1)}{4.l.e^3(S_2 \quad S_1)} \qquad (4)$$

$$T_r = \frac{3.F_{máx.}.L}{2.l.e^2} \qquad (5)$$

where: E_b = modulus of elasticity, in N/mm²; L= distance between the centers of the supports, in mm; l.e = width and thickness of the specimen, in mm; $F_2 - F_1$ = load increment in the straight portion of the load-strain curve, in N; $S_2 - S_1$ = vertical displacement increment at mid-span, corresponding to $F_2 - F_1$, in mm; T_r = modulus of rupture, in N/mm² and F_{max} = rupture load, in N.

The procedure for the glue-shear strength test is described in the NBR 9534 (1986)[21] code. This standard establishes that at least five test specimens should be taken from each plywood board.

This test served as the basis to evaluate the quality of the glue line and the plywood was classified according to the place where it would be utilized. The plywood boards

Table 1. Gluing parameters for plywood manufactured with castor-oil polyurethane adhesive.

Gluing parameters	
Moisture content of sheets	4 a 6%
Viscosity of adhesive	6 min
Gluing pressure	1.2 MPa
Time of pressure	10 min
Time curing total	4 days
Temperature of pressure	60 °C
Amount of adhesive used per area of sheet (weight)	250 g/m²

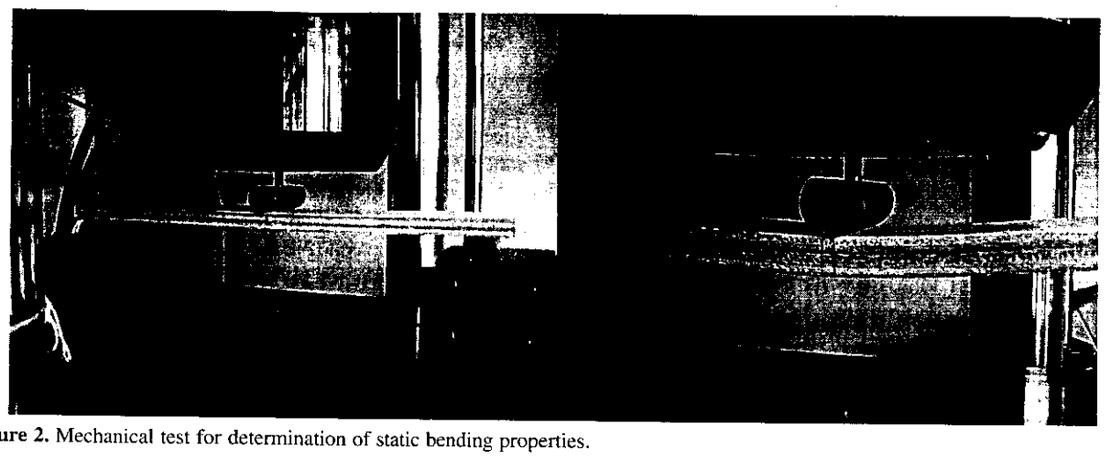


Figure 2. Mechanical test for determination of static bending properties.

destined for indoor use were evaluated through a dry test, intermediate plywood was evaluated in a damp test, and the exterior plywood was evaluated in a post-boiling test, based on their tensile strength values. These tests also yielded the wood's failure percentage, evaluated subjectively, whose value complements the results of the shear tests.

The dry test involves applying the load until complete rupture of the test specimen is achieved, with moisture content in equilibrium with the environment (approximately 12%). In the humid test, the specimen is completely submerged in water (15 ± 5) °C for 24 h and tested without prior drying. For the boiling state test, the specimen is submerged in boiling water for 4 h and dried for 20 h at a temperature of 62 ± 3 °C. The test specimen is then again submerged in boiling water for 4 h, cooled on cold water and tested while still damp. The tensile strength is calculated using Eq. 6.

$$t_r = \frac{F_{máx}}{a.b} \quad (6)$$

where: t_r = tensile strength, in N/mm²; $F_{máx}$ = rupture load, in N; a = distance between grooves, in; b = width of the specimen, in mm.

5. Results and Discussion

Tables 2 and 3 list the results obtained for moisture content, specific gravity, modulus of rupture and modulus of elasticity for plywood manufactured with castor oil-based polyurethane adhesive, considering the parallel and perpendicular direction of the grain of the external layers.

Rocco Lahr[22] and Sales[23] demonstrated that the values of the variation coefficients for the properties of wood are in the order of 18%, for wood with a moisture content of 12%. Tables 2 and 3 indicate that lower variation coefficients were obtained than those listed for wood. The Brazilian standards do not stipulate values for the variation coefficients of plywood. We have therefore adopted the standards listed for solid wood as a reference.

Table 2. Results in the tests for direction parallel to the grain of the external layers.

Specimens	Specific of gravity (g/cm³)	Modulus of rupture (N/mm²)	Modulus of elasticity (N/mm²)
C01	0.80	76	10080
C02	0.81	94	11577
C03	0.84	92	11631
C04	0.82	80	8565
C05	0.79	88	9835
C06	0.83	98	12106
C07	0.78	77	10758
C08	0.78	97	11928
C09	0.81	83	11700
C10	0.80	81	11318
C11	0.80	83	11710
C12	0.82	83	11418
C13	0.81	101	11965
C14	0.80	87	10877
Average	0.81	87	11105
Variation coefficient (%)	2.2	9.3	9.0
Moisture content (%)		11.4	

Table 4 lists the results of the wood's tensile strength and failure tests obtained in the glue-shear strength test carried out under dry, wet and boiling conditions.

The Brazilian NBR 9534 (1986)[24] code does not specify a

reference value for tensile strength in the shear test and requires a minimum wood failure percentage of 60, 60 and 80%, respectively, to classify plywood for indoor, intermediate and outdoor use. This standard is currently under review, and there is a tendency for adopting the requirements of the European Standard - EN 314-2 (1993)[24] presented in Table 5.

The European standard correlates the average tensile strength value with the average value of the failure percentage of wood. The requirements in terms of wood failure decrease as the tensile strength increases, and for values equal to or higher than 1.0 MPa there is no longer any failure percentage requirement.

The average tensile strength values listed in Table 4 exceeded 1.0 MPa under all the conditions tested here (dry, wet and boiling). Based on the European standard's requirements, it can be stated that plywood manufactured with castor oil-based polyurethane adhesive is suitable for indoor, intermediate and outdoor applications.

The low variation coefficient values indicate homogeneity in the manufacturing process and good distribution of the glue over all the layers.

5.1. Comparison of the mechanical properties of plywood found in the literature with those of plywood manufactured with castor oil-based polyurethane adhesive

Table 6 lists the values of some physical and mechanical properties reported in the literature for plywood made of Eucalyptus grandis and phenol-formaldehyde glue. This plywood was produced with seven layers and pressed for 13 min at 130 °C.

A comparison of the values listed in Tables 2 and 3 against those of Table 6 indicates that the plywood produced with the alternative castor oil-based polyurethane adhesive displays properties superior to those of commercial plywood. These values were higher in the direction perpendicular to the grain of the outside layers.

The Brazilian code NBR 9532 (1986)[6] determines minimum MOE values for plywood for outdoor and structural applications. A comparison of those values and those obtained for the plywood produced with castor oil-based poly

The MOE values are higher than those required by the

Table 3. Results in the tests for direction perpendicular to the grain of the external layers.

Specimens	Specific of gravity (g/cm³)	Modulus of rupture (N/mm²)	Modulus of elasticity (N/mm²)
C15	0.80	61	5700
C16	0.76	61	5887
C17	0.77	67	6338
C18	0.79	60	5783
C19	0.79	53	6159
C20	0.80	60	5830
C21	0.82	73	7407
C22	0.83	55	5384
C23	0.82	64	7199
C24	0.80	62	5888
C25	0.81	57	6319
C26	0.79	54	6110
C27	0.80	64	6427
C28	0.81	63	6975
Average	0.80	61	6243
Variation coefficient (%)	2.4	8.8	9.5
Moisture content (%)		11.4	

Table 4. Results of the plywood's glue-shear strength.

Condition of test	Average values of Glue-shear strength: Tensile strength (t_r) t_r N/mm² (Mpa)	Variation coefficient (%)	Wood's failure (%)
Dry (Moisture content: 11,4%)	3.1	13	78
Wet	2.7	12	32
Boiling	1.9	6	16
Number of specimens		14	

Table 5. Requirements of the European Standard for the plywood's glue-shear strength.

Glue-shear strength: Tensile strength - t_r (MPa)	Wood's failure (%)
0.2 ≤TR < 0.4	≥ 80
0.4 ≤TR < 0.6	≥ 60
0.6 ≤TR < 1.0	≥ 40
1.0 ≤TR	no exigency

Source: EN 314-2 (1993)[24].

Table 6. Mean values of physical and mechanical properties for plywood made of Eucalyptus grandis and phenol-formaldehyde glue.

Static bending		
Direction	Parallel to the grain	Perpendicular to the grain
Modulus of rupture (N/mm²)	.10830	4902
Modulus of elasticity (N/mm²)	80	49
Moisture content (%)	10.5	
Specific gravity (g/cm³)	0.72	

Table 7. Comparison between values of the alternative plywood properties with specified by ABNT.

Plywood specification	Módulus of elasticity (N/mm²)
ABNT NBR 9532 (1986)[6]	4000 - Mold for reinforced concrete 6000 - marine applications plywood
Manufactured with castor-oil-based polyurethane adhesive	11105 – parallel direction 6243 – perpendicular direction

NBR 9532 (1986)[6] code for plywood with satisfactory characteristics for outdoor application in molds for reinforced concrete and for marine applications. The values stipulated by the code correspond to the direction parallel to the fibers of the outside layers. According to Olin [5], the MOR and MOE values in static flexure in the parallel direction are always superior to those obtained in the direction along the fibers of the outside layers.

6. Conclusions

The plywood panels produced with castor oil-based polyurethane adhesive showed highly satisfactory results. The values of the properties of strength and stiffness obtained in the static bending test were higher than those reported in the literature for plywood made of the same species (Eucalytus grandis), using traditional glue (phenol-formaldehyde).

The MOEs exceeded those required by the NBR 9532[6] standard for plywood, showing characteristics suitable for outdoor applications. It should be noted that the MOE of plywood manufactured with castor oil-based polyurethane glue in the parallel direction to the grain exceeded the standard value listed in the code for the direction parallel to the external layers.

The results obtained in the glue-shear strength tests indicate the suitability of using the plywood studied here in indoor, intermediate and outdoor applications. The tests showed little variability, indicating the good quality of the glue line.

Low variation coefficients were obtained for all the physical and mechanical properties of the panels, which is a good indicator of the product's homogeneity and of the good performance in the production and tests of the plywood.

It is important to note that, in the manufacture of the plywood with castor oil-based polyurethane adhesive, the temperature of compression was 60 °C. This represents a significant reduction in energy consumption, considering that the curing of phenol-formaldehyde resin is processed at temperatures of 130 to 160 °C. Thus, the castor oil-based polyurethane adhesive is a promising alternative for use in plywood production.

Acknowledgments

The authors thank CNPq and FAPESP (Brazilian agencies) for their financial support of this research.

References

1. Guss, L.M. Engineered wood products: the future is bright, *Forest Products Journal*, v. 45, n. 7, p.17-24, 1995.
2. Jesus, J.M.H. *Estudo do adesivo poliuretano à base de mamona em madeira laminada colada*, Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, p. 106, 2000.
3. Maloney, T.M. The family of wood composite materials, *Forest Products Journal*, v. 10, n. 2, p. 19-26, 1996.
4. Youngquist, A.J. Wood-based Composites and Panel Products, *Wood handbook*. Gen. Tech. Rep. FPL. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, FPL, v. 10, p. 6-12, 1999.
5. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9531, *Chapas de madeira compensada: Classificação*, Rio de Janeiro, p. 3, 1986.
6. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9532, *Chapas de madeira compensada: Especificação*, Rio de Janeiro, p. 3, 1986.
7. Cerliani, C.; Baggenstos, T.S. Engineered wood products: The future is bright, *Forest Prod. Suise. J.* v. 47, p. 17-24, 1997.
8. Zugman, I.C. Painel geral sobre a produção de compensados. *Silvicultura*, v. 15, n. 55, p. 12-18, 1994.
9. Nock, H.P.; Richter, H.G. *Adesão e adesivos*, Curitiba, Universidade Federal do Paraná, p. 93, 1978.
10. Golfari, L.; Pinheiro Neto, F. A. Escolha de espécies de Eucalipto potencialmente aptas para as diferentes regiões do Brasil, *Brasil Florestal*, p. 3-23, 1970.
11. Jankowsky, I.P. Manufatura de painéis compensados com madeira de Eucalyptus spp: resultados preliminares. Piracicaba: *ESALQ. IPEF*, n. 82, p. 4, 1979.
12. Keinert Jr. Produção de compensado, *Revista da Madeira*, n. 24. p. 42-45, 1996.
13. Peterson, R.W. Wood adhesives, *Forest Products Research Branch*. Otawa, n. 1055, 1964.
14. Samlaic, J. Os atuais problemas e as possibilidades dos adesivos para madeira, *Revista da Madeira*, n. 374, p. 7-10, 1983.
15. Claro Neto, S. *Caracterizações físico-químicas de um poliuretano derivado de óleo de mamona utilizado para implantes ósseos*, Tese (Doutorado), Instituto de Química de São Carlos, USP, São Carlos, p. 123, 1997.
16. Araújo, L.C.R. *Caracterização química e mecânica de poliuretanas elastoméricas baseadas em materiais oleoquímicos*, Dissertação (Mestrado).

Instituto de Física e Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1992.

17. Azambuja, M. A. *Avaliação do adesivo poliuretano à base de mamona para fabricação de MLC*, Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos.
18. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9584, *Chapas de madeira compensada: Determinação do teor de umidade*, Rio de Janeiro, p. 3, 1985.
19. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9485, *Chapas de madeira compensada: Determinação da massa específica aparente*, Rio de Janeiro, p. 3, 1985.
20. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9533, *Compensado: Determinação da resistência à flexão estática*, Rio de Janeiro, p. 3, 1986.
21. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9534, *Compensado: Determinação da resistência da colagem ao esforço de cisalhamento*, Rio de Janeiro, p. 4, 1986.
22. Rocco Lahr, F.A. *Considerações a respeito da variabilidade de propriedades de resistência e elasticidade da madeira*, Tese (Livre Docência), Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Paulo, p. 109 1990.
23. Sales, A. *Proposição de classes de resistência para madeira*, Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 223, 1996.
24. European Standard (versão portuguesa), 2001 - NP/EN 314 - 2 - *Contraplacado: qualidade de colagem*, Parte 2: Requisitos, p. 10.

Livros Grátis

(http://www.livrosgratis.com.br)

Milhares de Livros para Download:

Baixar livros de Administração
Baixar livros de Agronomia
Baixar livros de Arquitetura
Baixar livros de Artes
Baixar livros de Astronomia
Baixar livros de Biologia Geral
Baixar livros de Ciência da Computação
Baixar livros de Ciência da Informação
Baixar livros de Ciência Política
Baixar livros de Ciências da Saúde
Baixar livros de Comunicação
Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE
Baixar livros de Defesa civil
Baixar livros de Direito
Baixar livros de Direitos humanos
Baixar livros de Economia
Baixar livros de Economia Doméstica
Baixar livros de Educação
Baixar livros de Educação - Trânsito
Baixar livros de Educação Física
Baixar livros de Engenharia Aeroespacial
Baixar livros de Farmácia
Baixar livros de Filosofia
Baixar livros de Física
Baixar livros de Geociências
Baixar livros de Geografia
Baixar livros de História
Baixar livros de Línguas

Baixar livros de Literatura
Baixar livros de Literatura de Cordel
Baixar livros de Literatura Infantil
Baixar livros de Matemática
Baixar livros de Medicina
Baixar livros de Medicina Veterinária
Baixar livros de Meio Ambiente
Baixar livros de Meteorologia
Baixar Monografias e TCC
Baixar livros Multidisciplinar
Baixar livros de Música
Baixar livros de Psicologia
Baixar livros de Química
Baixar livros de Saúde Coletiva
Baixar livros de Serviço Social
Baixar livros de Sociologia
Baixar livros de Teologia
Baixar livros de Trabalho
Baixar livros de Turismo