

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA  
FILHO” CAMPUS DE ITAPEVA

ISABELLA IMAKAWA DE ARAÚJO

**PAINEL PARTICULADO COMPOSTO POR CASCA DE  
EUCALIPTO NA CAMADA INTERMEDIÁRIA**

Itapeva – SP

2011



ISABELLA IMAKAWA DE ARAÚJO

**PAINEL PARTICULADO COMPOSTO POR CASCA DE  
EUCALIPTO NA CAMADA INTERMEDIÁRIA**

Trabalho de graduação apresentado como requisito para  
obtenção do título de Engenheira Industrial Madeireira  
pela Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita  
Filho” (UNESP)

Orientador: Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Cristiane Inácio de Campos

Itapeva – SP

2011

**FICHA CATALOGRÁFICA**

|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A659p | <p data-bbox="435 477 713 506">Araújo, Isabella Imakawa</p> <p data-bbox="435 508 1209 598">Produção de painel particulado composto por casca de eucalipto na camada intermediária / Isabella Imakawa de Araújo. -- Itapeva, 2011. 95 f.; il.</p> <p data-bbox="435 631 1209 689">Trabalho de Graduação do Curso Engenharia Industrial Madeireira apresentado ao Campus Experimental de Itapeva – UNESP, 2011.</p> <p data-bbox="488 692 1038 721">Orientador: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Cristiane Inácio de Campos.</p> <p data-bbox="435 723 1197 813">Banca examinadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maristela Gava, Prof. Dr. Ricardo Marques Barreiros</p> <p data-bbox="488 784 684 813">Inclui bibliografia</p> <p data-bbox="435 851 1256 911">1. Painéis de Madeira. 2. Eucalipto. 3. Propriedades Mecânicas. I. Título. II. Itapeva - Curso de Engenharia Industrial Madeireira.</p> <p data-bbox="959 945 1110 974">CDD 674.836</p> |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da UNESP – Campus Experimental de Itapeva.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA  
FILHO” CAMPUS EXPERIMENTAL DE ITAPEVA

**PRODUÇÃO DE PAINEL PARTICULADO COMPOSTO  
POR CASCA DE EUCALIPTO NA CAMADA  
INTERMEDIÁRIA**

ISABELLA IMAKAWA DE ARAUJO

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO  
COMO PARTE REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA  
DE **GRADUADO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL  
MADEIREIRA**

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL  
MADEIREIRA

Prof. Dr. José Cláudio Caraschi  
Coordenador de Curso

**BANCA EXAMINADORA:**

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup>. Cristiane Inácio de Campos

Orientador – Campus Experimental de Itapeva/UNESP

Prof. Dr. Ricardo Marques Barreiros

Campus Experimental de Itapeva/UNESP

Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Maristela Gava

Campus Experimental de Itapeva/UNESP

Para Deus e à minha família que sempre esteve presente nos momentos em que mais precisei, sem o apoio de vocês, esse trabalho não teria sido concluído e também por compreenderem minha ausência durante a realização deste trabalho.

## AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Glória Mitsuco Imakawa, pelo esforço, dedicação e compreensão, em todos os momentos desta e de outras caminhadas.

Aos meus irmãos, Caio, Vitor e Pedro, por todo amor.

Aos meus tios, Valter, José Roberto, Valmir e Nádia, e ao meu padrasto, Neto, por todo o apoio.

Aos meus queridos avôs, Yosiro e Alice, por toda confiança que depositaram em mim.

Aos meus primos que são como irmãos, Lucas, Thiago e Rafael.

À Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Cristiane Inácio de Campos, pela orientação e correção do meu trabalho e também por todos os conselhos dados.

Aos amigos conquistados em Itapeva, minha mais nova e tão querida família, Bruna, Karla, Bruno Ferreira, Bruno Araújo, Diego, Fabiane, Felipe, Kenzo, Marcellus, Yuzo, com vocês aprendi muito.

Às minhas companheiras de república e amigas, Ana Clara, Bruna, Camila, Karina e Renata, por sempre estarem ao meu lado.

Aos amigos Carlos, Guilherme, Ana Clara e Karina que me ajudaram na realização deste trabalho.

Aos integrantes da República “Portão Azul” pelos momentos de confraternização.

Aos amigos itapevenses e a todas as repúblicas.

Aos funcionários do LaMEM por toda a ajuda durante a realização deste trabalho.

À Momentive Química do Brasil Ltda. pela doação do adesivo.

Ao Laboratório de Máquinas e Engenharia da Madeira – ESALQ/USP – Piracicaba e Laboratório de Processamento da Madeira da UNESP – Campus de Bauru, pela doação da madeira.

À Duratex – Itapetininga pela doação da casca.

A todos os funcionários da UNESP – Campus de Itapeva que me ajudaram na realização deste trabalho, em especial ao Brito.

A todos os meus professores que ajudaram na minha formação, obrigada por todos os ensinamentos.

## RESUMO

Este trabalho teve como objetivo produzir e avaliar as propriedades físicas e mecânicas de um painel particulado de três camadas a partir das especificações de ensaio da NBR 14810-3 (2006), utilizando madeira de *Eucalyptus sp.* e casca de *Eucalyptus urograndis* e *Eucalyptus saligna*. As propriedades mecânicas avaliadas foram flexão estática para cálculo de Módulo de Ruptura (MOR) e Módulo de Elasticidade (MOE) e Adesão interna (tração perpendicular). As propriedades físicas avaliadas foram inchamento em espessura, absorção de água, teor de umidade e densidade das chapas. Avaliaram-se quatro diferentes composições de painel contendo 5, 10, 15 e 20% de casca na camada interna. Os resultados foram comparados com a norma brasileira NBR 14810-2 (2006) e, também com estudos encontrados na literatura. Os painéis produzidos mostraram-se adequados a todos os valores ideais propostos pela norma apenas na composição com 5% de casca na camada interna. Os demais tratamentos avaliados apresentaram resultados satisfatórios em todos os ensaios exceto para o teor de umidade.

Palavras-chave: Painel particulado, casca, eucalipto, propriedades físicas, propriedades mecânicas.

## ABSTRACT

This work was developed to evaluate the physical and mechanical properties of a panel of three particle layers from the test specification of NBR 14810-3 (2006), using wood of *Eucalyptus sp.* and *Eucalyptus saligna* and *Eucalyptus urograndis* bark. The mechanical properties were evaluated to obtain the bending modulus of rupture (MOR) and modulus of elasticity (MOE) and Internal bond. The physical properties were obtained thickness swelling, water absorption, moisture content and board density. Were evaluated four different compositions of panels containing 5, 10, 15 and 20% in the inner layer of bark. The results were compared with the Brazilian standard NBR 14810-2 (2006) and also with studies in the literature. The panels produced were adequate to all the optimal values suggested by the standard only in the composition with 5% skin in the inner layer. The other treatments showed satisfactory results in all tests except for moisture content.

Keywords: Panel particulate, bark, eucalyptus, physical properties, mechanical properties.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Evolução do preço médio de painéis de madeira no mundo*.....                                                   | 19 |
| Figura 2: Evolução do consumo de painéis de madeira no Brasil.....                                                       | 22 |
| Figura 3: <i>Eucalyptus grandis</i> . Variação da porcentagem de casca no sentido base-topo.<br>.....                    | 27 |
| Figura 4: Cascas lisas e brilhosas. ....                                                                                 | 27 |
| Figura 5: Cascas esfoliantes. ....                                                                                       | 28 |
| Figura 6: Casca vermelha. ....                                                                                           | 28 |
| Figura 7: Casca permanente enrugada.....                                                                                 | 29 |
| Figura 8: Casca em forma de escamas.....                                                                                 | 29 |
| Figura 9: Custo de produção de alguns painéis. ....                                                                      | 33 |
| Figura 10: Disposição das partículas nos diferentes tipos de chapas. ....                                                | 39 |
| Figura 11: Processo de produção de chapas de partículas aglomeradas.....                                                 | 40 |
| Figura 12: Pré-prensa. ....                                                                                              | 44 |
| Figura 13: Prensa de abertura simples.....                                                                               | 47 |
| Figura 14: Prensa de múltiplas aberturas.....                                                                            | 47 |
| Figura 15: Picador laboratorial.....                                                                                     | 51 |
| Figura 16: Moinho.....                                                                                                   | 52 |
| Figura 17: Agitador de Peneiras para Análises Granulométricas Eletromagnético. ....                                      | 52 |
| Figura 18: Prensa termo-hidráulica. ....                                                                                 | 53 |
| Figura 19: Estufa para Secagem e Esterilização.....                                                                      | 53 |
| Figura 20: Misturador de adesivo com as partículas. ....                                                                 | 54 |
| Figura 21: Equipamento para a pré-prensagem à frio dos painéis. ....                                                     | 54 |
| Figura 22: Forma de madeira que acomoda as partículas. ....                                                              | 56 |
| Figura 23: Chapa de partículas pronta, antes de passar na serra esquadrejadeira. ....                                    | 56 |
| Figura 24: Esquema dos cortes dos corpos-de-prova. Em vermelho se encontra parte da<br>chapa que não foi utilizada. .... | 57 |
| Figura 25: Máquina universal de ensaios para realização de testes mecânicos.....                                         | 58 |
| Figura 26: Acessório utilizado no ensaio de adesão interna.....                                                          | 58 |
| Figura 27: Acessório utilizado no ensaio de flexão.....                                                                  | 59 |
| Figura 28: Sapata de madeira e corpo-de-prova já colado nas sapatas. ....                                                | 59 |
| Figura 29: Balança digital semi-analítica. ....                                                                          | 60 |

|                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 30: Pontos de medição no corpo-de-prova.....                                                       | 63 |
| Figura 31: Forma de colocação do corpo-de-prova sobre os apoios da máquina universal de ensaios.....      | 66 |
| Figura 32: Dimensões dos blocos de tração. ....                                                           | 69 |
| Figura 33: Acessório para acoplar dispositivo metálico circular. ....                                     | 69 |
| Figura 34: Corpo-de-prova entre blocos de tração formando um conjunto. ....                               | 70 |
| Figura 35: Dimensões dos dispositivos para prender os blocos de tração.....                               | 71 |
| Figura 36: Ensaio de flexão estática com a chapa de situação 1 (5% de casca na camada interna).....       | 88 |
| Figura 37: Ensaio de flexão estática com a chapa de situação 2 (10% de casca na camada interna).....      | 89 |
| Figura 38: Ensaio de flexão estática com a chapa de situação 3 (15% de casca na camada interna).....      | 90 |
| Figura 39: Ensaio de flexão estática com a chapa de situação 4 (20% de casca na camada interna).....      | 91 |
| Figura 40: Ensaio de tração perpendicular com a chapa de situação 1 (5% de casca na camada interna).....  | 92 |
| Figura 41: Ensaio de tração perpendicular com a chapa de situação 2 (10% de casca na camada interna)..... | 93 |
| Figura 42: Ensaio de tração perpendicular com a chapa de situação 3 (15% de casca na camada interna)..... | 94 |
| Figura 43: Ensaio de tração perpendicular com a chapa de situação 4 (20% de casca na camada interna)..... | 95 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1: Preço médio e faturamento da indústria de painéis de madeira. ....                                                                   | 17 |
| Tabela 2: Produção mundial de painéis de madeira (2008).....                                                                                   | 18 |
| Tabela 3: Capacidade de produção das maiores empresas de painéis de madeira<br>reconstituída do mundo. ....                                    | 20 |
| Tabela 4: Teor de cascas de espécies de Eucalipto. ....                                                                                        | 26 |
| Tabela 5: Massa de casca e de madeira em gramas utilizada em cada situação, onde (CI)<br>significa camada interna e (CE) é camada externa..... | 50 |
| Tabela 6: Corpos-de-prova para ensaio de densidade. ....                                                                                       | 73 |
| Tabela 7: Corpos-de-prova para ensaio de Teor de Umidade. ....                                                                                 | 74 |
| Tabela 8: Corpos-de-prova (CP) para ensaio de Inchamento em espessura por 2 h. ....                                                            | 75 |
| Tabela 9: Corpos-de-prova para ensaio de Inchamento em espessura por 24 h.....                                                                 | 76 |
| Tabela 10: Corpos-de-prova para ensaio de Absorção 2 horas. ....                                                                               | 77 |
| Tabela 11: Corpos-de-prova para ensaio de Absorção de água por 24 h. ....                                                                      | 78 |
| Tabela 12: Corpos-de-prova para ensaio de Flexão estática, apresentando os valores de<br>MOR e MOE em MPa.....                                 | 79 |
| Tabela 13: Valores de tensão do ensaio de Tração perpendicular, expressos em MPa..                                                             | 80 |

## SUMÁRIO

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. INTRODUÇÃO .....                                                            | 14 |
| 2. OBJETIVOS.....                                                              | 16 |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....                                                  | 17 |
| 3.1. Tendências de Mercado .....                                               | 17 |
| 3.1.1. No Brasil.....                                                          | 19 |
| 3.2. Matéria-prima .....                                                       | 22 |
| 3.2.1. Madeira.....                                                            | 22 |
| 3.2.2. Adesivo.....                                                            | 31 |
| 3.2.3. Aditivos .....                                                          | 33 |
| 3.2.4. Resíduo .....                                                           | 34 |
| 3.3. Painéis à base de madeira .....                                           | 35 |
| 3.3.1. Aglomerados.....                                                        | 37 |
| 3.4. Processo de produção industrial das chapas de partículas aglomeradas..... | 40 |
| 3.4.1. Geração das partículas .....                                            | 40 |
| 3.4.2. Secagem das partículas.....                                             | 41 |
| 3.4.3. Classificação das partículas .....                                      | 42 |
| 3.4.4. Aplicação do adesivo.....                                               | 42 |
| 3.4.5. Formação do colchão.....                                                | 43 |
| 3.4.6. Pré-prensagem do painel .....                                           | 44 |
| 3.4.7. Prensagem do painel.....                                                | 45 |
| 3.4.8. Acabamento dos painéis .....                                            | 48 |
| 4. MATERIAIS E MÉTODOS .....                                                   | 49 |
| 4.1. Materiais .....                                                           | 49 |
| 4.2. Métodos .....                                                             | 50 |
| 4.2.1. Equipamentos utilizados na confecção do painel.....                     | 51 |
| 4.2.2. Fabricação das chapas de partículas em laboratório.....                 | 55 |

|                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.2.3. Equipamentos utilizados nos ensaios físicos e mecânicos .....                                               | 57 |
| 4.2.4. Ensaios físicos e mecânicos.....                                                                            | 60 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....                                                                                   | 72 |
| 5.1. Densidade.....                                                                                                | 72 |
| 5.2. Teor de umidade .....                                                                                         | 73 |
| 5.3. Inchamento em espessura por 2 horas .....                                                                     | 74 |
| 5.4. Inchamento em espessura por 24 horas .....                                                                    | 75 |
| 5.5. Absorção de água por 2 horas.....                                                                             | 76 |
| 5.6. Absorção de água por 24 horas.....                                                                            | 77 |
| 5.7. Ensaio de flexão estática – MOE e MOR.....                                                                    | 78 |
| 5.8. Tração perpendicular .....                                                                                    | 79 |
| 6. CONCLUSÃO .....                                                                                                 | 81 |
| 7. BIBLIOGRAFIA.....                                                                                               | 82 |
| APÊNDICE A - RESULTADOS E GRÁFICOS OBTIDOS NOS ENSAIOS<br>MECÂNICOS DE FLEXÃO ESTÁTICA E TRAÇÃO PERPENDICULAR..... | 87 |

## 1. INTRODUÇÃO

Os painéis de madeira aglomerada surgiram na Alemanha no início da década de 40, como forma de viabilizar a utilização de resíduos de madeira, face à dificuldade de obtenção de madeiras de boa qualidade para produção de painéis compensados, devido ao isolamento da Alemanha durante a 2ª guerra mundial (IWAKIRI et al., 2005).

Começaram a ser produzidos no Brasil em 1966, pela Placas do Paraná S.A., instalada na cidade de Curitiba/PR. Na condição de um produto novo no mercado brasileiro, o aglomerado passou por períodos de questionamento, principalmente, quanto às limitações técnicas, como alta absorção de água e inchamento em espessura, usinabilidade de bordos e problemas quanto à fixação de parafusos. No decorrer do tempo, foram incorporadas novas tecnologias, como uso de parafina, controle do gradiente de densidade e sistemas de parafusamento mais eficientes, visando minimizar tais problemas, tornando, o aglomerado uma das principais matérias-primas para o setor moveleiro brasileiro (ABIMCI, 1999).

Os produtos engenheirados de madeira têm apresentado crescente desenvolvimento, principalmente no final do século XX. Acompanhando esse desenvolvimento, e a crescente demanda por tais produtos, a indústria madeireira vem cada vez mais desenvolvendo tecnologias para o uso mais eficiente da madeira a partir de árvores de menores dimensões. (AMERICAN FOREST & PAPER ASSOCIATION, 2006).

O Brasil dispõe de condições bastante especiais para se tornar um importante produtor mundial de painéis à base de madeira, uma vez que é detentor de tecnologia que permite a utilização de extensas plantações de florestas de rápido crescimento. Essa característica, associada a materiais e produtos alternativos, pode se tornar um dos principais alavancadores dos novos investimentos para viabilizar a fabricação de tais produtos.

A indústria madeireira, em alguns segmentos, caracteriza-se por gerar grande quantidade de resíduos e, embora seja um assunto bastante estudado com o objetivo de minimizar essa geração, muitas vezes não é possível reduzi-los devido às características próprias do processo. O processamento mecânico primário da madeira, embora com alta tecnologia gera no mínimo 40% de resíduo a partir do volume da tora.

Os resíduos gerados no processamento da madeira, quando não utilizados, tornam-se um problema econômico e ambiental. Problema econômico devido à subutilização da

madeira, levando a curta duração do estabelecimento das empresas, ao baixo valor agregado aos produtos fabricados. E problema ambiental, oriundo do grande volume de resíduos gerando situações preocupantes como a queima e a disposição indevida do material no solo e cursos d'água.

Dessa forma abre-se espaço para pesquisas na busca por soluções tecnológicas para novos produtos e também para soluções quanto ao problema de utilização, destinação, valoração e minimização na produção de resíduos, buscando agregar valor a estes subprodutos do processamento da madeira.

## 2. OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho foi produzir e caracterizar painéis de partículas compostos por três camadas, sendo que na camada intermediária utilizou-se casca de *Eucalyptus urograndis* e *Eucalyptus saligna*, aproveitando assim, uma matéria-prima abundante disponível, no entanto, descartada por não apresentar um uso que agregue mais valor.

Os objetivos específicos do presente estudo foram:

- Produção de painéis a partir de partículas de eucalipto para todas as camadas e casca de eucalipto, compondo a camada interna nas porcentagens de 5, 10, 15 e 20%.
- Realização de ensaios de caracterização física e mecânica a partir de documentos normativos, segundo especificações da Norma Brasileira ABNT NBR 14810 para cada uma das situações propostas.
- Análise dos resultados a partir de valores especificados em normas e valores encontrados na literatura.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir será apresentada breve revisão da literatura onde buscou-se embasamento teórico para a realização do presente estudo.

#### 3.1. Tendências de Mercado

Os painéis de madeira aglomerada são os mais consumidos no mundo, entre os diferentes tipos de painéis tratados neste trabalho. No período entre 1995 e 2005, o consumo mundial de aglomerado/MDP cresceu a uma taxa média anual de 4,2% (MATTOS et al., 2008).

A indústria mundial de painéis de madeira apresentou faturamento em 2008 de cerca de US\$ 98,3 bilhões (Tabela 1), sendo US\$ 57,9 bilhões representados pelos painéis de madeira reconstituída e US\$ 40,3 bilhões pelos painéis de madeira processada mecanicamente. O comércio mundial atingiu cerca de um terço da produção mundial, com destaque para a Europa, líder tanto nas exportações quanto nas importações (BIAZUS et al., 2010).

Tabela 1: Preço médio e faturamento da indústria de painéis de madeira.

| <b>Painéis de madeira</b>                   |               |       |            |                             | Total        |
|---------------------------------------------|---------------|-------|------------|-----------------------------|--------------|
| Preço/<br>faturamento                       | Reconstituída |       |            | Processada<br>mecanicamente |              |
|                                             | MDP           | MDF   | Chapa dura | Compensado                  |              |
| <b>Preço médio<br/>(US\$/m<sup>3</sup>)</b> | 303,1         | 360,0 | 680,9      | 521,6                       | <b>466,4</b> |
| <b>Faturamento<br/>(US\$ bilhões)</b>       | 31,4          | 20,6  | 5,9        | 40,3                        | <b>98,3</b>  |

Fonte: Elaboração do BNDES, com base em dados de FAO, Abipa e Abimci (2008) apud Biazus et al. (2010).

A produção mundial de painéis foi de 246,9 milhões de m<sup>3</sup> em 2008, sendo 69% referentes aos painéis de madeira reconstituída (169,5 milhões de m<sup>3</sup>) e 31% referentes aos painéis de madeira processada mecanicamente (Tabela 2). Cerca de 73% da produção mundial

esteve concentrada em 10 países, com destaque para a China, responsável por 31% da produção mundial e líder na produção de MDF e de compensados. A produção da China, Estados Unidos e Alemanha representam 51% da produção mundial de painéis de madeira (BIAZUS, 2010).

Tabela 2: Produção mundial de painéis de madeira (2008).

| Posição/país                  | Painéis de madeira       |                          |                                 |                                 | Total<br>(m <sup>3</sup> ) |
|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------|
|                               | Reconstituída            |                          |                                 | Processada<br>mecanicamente     |                            |
|                               | MDP<br>(m <sup>3</sup> ) | MDF<br>(m <sup>3</sup> ) | Chapa dura<br>(m <sup>3</sup> ) | Compensado<br>(m <sup>3</sup> ) |                            |
| <b>1ª China</b>               | 11.505.000               | 27.405.000               | 1.436.000                       | 36.220.000                      | <b>76.566.000</b>          |
| <b>2ª EUA</b>                 | 18.164.320               | 3.021.390                | 860.000                         | 10.375.740                      | <b>32.421.450</b>          |
| <b>3ª Alemanha</b>            | 10.193.000               | 4.602.525                | 1.939.850                       | 204.300                         | <b>16.939.675</b>          |
| <b>4ª Canadá</b>              | 7.962.000                | 1.207.000                | 103.000                         | 2.225.000                       | <b>11.497.000</b>          |
| <b>5ª Rússia</b>              | 5.750.000                | 1.170.000                | 510.000                         | 2.583.000                       | <b>10.013.000</b>          |
| <b>6ª Brasil</b>              | 2.617.070                | 2.073.800                | 510.660                         | 2.631.000                       | <b>7.832.530</b>           |
| <b>7ª Polônia</b>             | 5.087.994                | 1.760.402                | 215.602                         | 395.326                         | <b>7.459.324</b>           |
| <b>8ª Malásia</b>             | 222.000                  | 1.274.000                | 120.000                         | 5.601.000                       | <b>7.217.000</b>           |
| <b>9ª França</b>              | 4.525.049                | 1.016.584                | 126.681                         | 360.000                         | <b>6.028.314</b>           |
| <b>10ª Turquia</b>            | 3.181.000                | 1.921.000                | 250.000                         | 111.000                         | <b>5.463.000</b>           |
| <b>Total<br/>(10 maiores)</b> | <b>69.207.433</b>        | <b>45.451.701</b>        | <b>6.071.793</b>                | <b>60.706.366</b>               | <b>181.437.293</b>         |
| <b>Total<br/>(mundo)</b>      | <b>103.534.985</b>       | <b>57.313.163</b>        | <b>8.653.460</b>                | <b>77.356.105</b>               | <b>246.857.713</b>         |
| <b>% 10<br/>maiores</b>       | <b>67%</b>               | <b>79%</b>               | <b>70%</b>                      | <b>78%</b>                      | <b>73%</b>                 |

Fontes: FAO, Abipa e Abimci (2008) apud Biazus et al. (2010).

Obs: Para MDP, a FAO utiliza o código 1.646, que inclui Flaxboard e exclui lâ de madeira e placas de outra partícula com ligantes inorgânicos.

De acordo com Biazus et al. (2010), os preços dos painéis de madeira são ordenados, do maior para o menor, da seguinte maneira: o produto mais caro é a chapa de fibra, com preço médio de US\$ 680/m<sup>3</sup> em 2008, seguida dos compensados, com US\$ 522/m<sup>3</sup>. No mesmo ano, o preço médio do MDF foi estimado em US\$ 360/m<sup>3</sup>, enquanto o MDP atingiu US\$ 303/m<sup>3</sup>. O aumento médio de preço dos painéis de madeira esteve em 1,4% a.a. no período 1997-2008, destacando-se o aumento médio de 4,8% a.a. nos preços das chapas de fibra,

provavelmente por causa da queda mais acelerada da produção de chapas em relação a sua demanda (Figura 1).

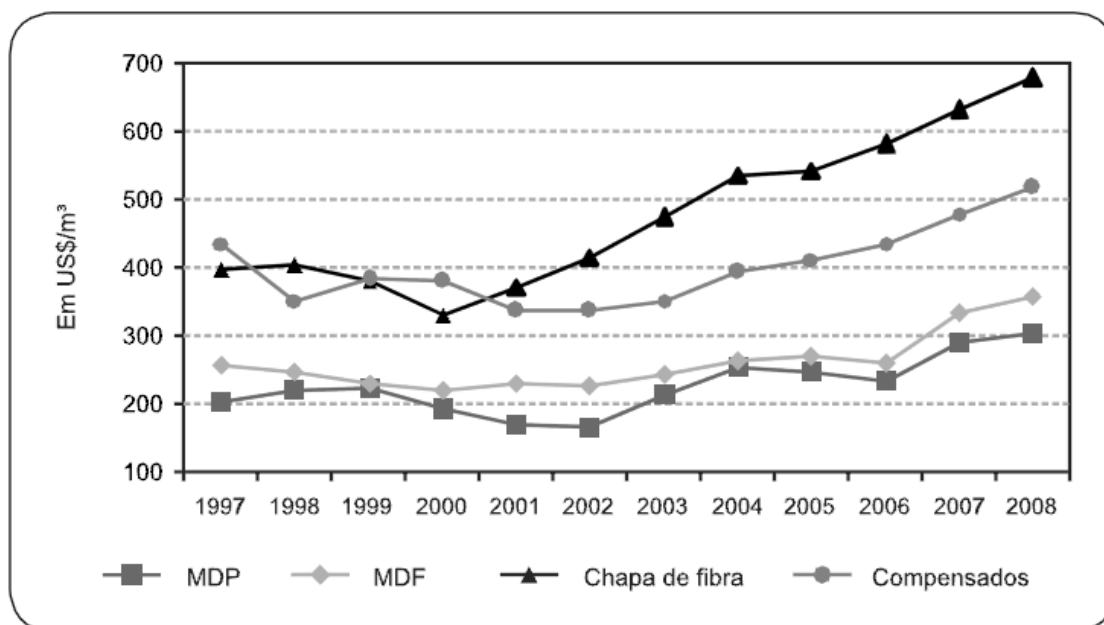


Figura 1: Evolução do preço médio de painéis de madeira no mundo\*.

Fonte: Elaboração do BNDES, com base em dados da FAO (2008) apud Biazus et al. (2010).

\* Revestidos e não revestidos.

### 3.1.1. No Brasil

O mercado brasileiro de painéis de madeira ainda está em processo de consolidação e apresenta grande dinamismo, sobretudo no segmento de MDF, cujo consumo cresceu bem acima da taxa média do setor nos últimos 12 anos. Quando se compara tal crescimento com a evolução do PIB nacional, a diferença é ainda maior.

Após um movimento de consolidação no início de 2005, quando a empresa chilena Arauco adquiriu a Placas do Paraná, foi a vez de a também chilena Masisa adquirir parte da Tafisa Brasil no início de 2008, embora o negócio tenha sido desfeito em razão da falta de consenso quanto à união das operações. Em 2009, novo movimento intenso, com a fusão entre a Duratex e a Satipel, seguida da aquisição da Tafisa Brasil pela Arauco. Na fusão da Duratex

com a Satipel, a Itausa (controladora da Duratex) e a Companhia Ligna de Investimentos (controladora da Satipel Industrial) assinaram contrato de associação das duas companhias controladas em julho de 2009, o que deu origem a maior empresa de painéis de madeira industrializada do hemisfério sul (Tabela 3) e promoveu importante consolidação no segmento de MDP no Brasil. O acordo gerou a incorporação da Satipel pela Duratex e a nova companhia passou a ser denominada Duratex S.A (BIAZUS et al., 2010).

Tabela 3: Capacidade de produção das maiores empresas de painéis de madeira reconstituída do mundo.

| Posição/empresa              | País       | Capacidade (mil m <sup>3</sup> ) |
|------------------------------|------------|----------------------------------|
| 1 <sup>a</sup> Kronospan     | Inglaterra | 12.500                           |
| 2 <sup>a</sup> Tafisa        | Portugal   | 10.110                           |
| 3 <sup>a</sup> Pfleiderer    | Alemanha   | 6.550                            |
| 4 <sup>a</sup> LP            | EUA        | 5.550                            |
| 5 <sup>a</sup> EGGER         | Inglaterra | 5.450                            |
| 6 <sup>a</sup> Norbord       | Canadá     | 5.400                            |
| 7 <sup>a</sup> Krono         | Suíça      | 5.050                            |
| 8 <sup>a</sup> Duratex       | Brasil     | 3.910                            |
| 9 <sup>a</sup> Finsa         | Espanha    | 3.700                            |
| 10 <sup>a</sup> Weyerhaeuser | EUA        | 3.300                            |
| <b>Total (10 maiores)</b>    |            | <b>61.520</b>                    |

Fonte: Duratex (novembro de 2009) apud Biazus et al. (2010).

Obs.: Inclui capacidade de produção de *Oriented Strand Board* (OSB).

Em agosto de 2009, a Placas do Paraná S.A. adquiriu 100% das ações da Tafisa Brasil S.A., originando a Arauco do Brasil S.A. A operação atingiu US\$ 227 milhões. A nova empresa ganhou mais espaço tanto no mercado de MDP quanto no mercado de MDF. Em 2008, a indústria de painéis de madeira reconstituída tinha capacidade instalada de 6,5 milhões de m<sup>3</sup>/ano e estava dividida entre sete empresas (Duratex, Arauco do Brasil, Berneck, Eucatex, Fibraplac, Masisa do Brasil e Bonet). Juntas, a Duratex e a Arauco do Brasil eram responsáveis por 64% desse total. A utilização de capacidade instalada estava em torno de 80%, patamar condizente com a média dos últimos 12 anos e que estimula investimentos em ampliação de capacidade produtiva. No que se refere ao MDP, em 2008 existiam cinco fabricantes e capacidade total de 3,1 milhões de m<sup>3</sup>/ano, sendo eles: Duratex, Arauco do Brasil, Berneck,

Eucatex e Bonet. Os destaques eram a Duratex e a Berneck, detentoras de 68% da capacidade total. A utilização da capacidade instalada chegou a 84%. A produção brasileira de painéis de madeira atingiu 7,8 milhões de m<sup>3</sup> em 2008, sendo 34% de compensados, 33% de MDP, 26% de MDF e 7% de chapas de fibra. Em média, a produção brasileira de painéis de madeira aumentou em 7,6% a.a., sendo 10,3% a.a. para os painéis de madeira reconstituída e 3,9% a.a. para os compensados. A produção de compensados, apesar de ainda liderar em proporção, é basicamente destinada à exportação (73% do total). No caso dos demais segmentos, a razão exportação sobre produção ficou em 31% para a chapa de fibra e em apenas 1% tanto para o MDP quanto para o MDF em 2008. Não menos importante para a avaliação da oferta interna, o Brasil importou cerca de 4,5% do total consumido em painéis de madeira no ano de 2008, abaixo da média histórica, sendo aproximadamente 81% de MDF, 16% de MDP e 3% de chapa de fibra, com um volume total de 266 mil m<sup>3</sup>. O motivo para as importações abaixo da média histórica esteve no efeito defasado do acréscimo expressivo de capacidade no biênio 2002-2003 (BIAZUS et al., 2010).

Nos últimos 12 anos, o consumo de painéis de madeira apresentou crescimento médio de 7,2% a.a. (11,2% a.a. para os painéis de madeira reconstituída e 4,2% a.a. para os compensados), basicamente em função da qualidade dos novos produtos oferecidos, sobretudo do MDF, e da escassez de madeira maciça. Em 1997 o consumo brasileiro era de 2,8 milhões de m<sup>3</sup> e em 2008 atingiu 5,9 milhões de m<sup>3</sup>, sendo o MDP e o MDF responsáveis por 4,9 milhões de m<sup>3</sup> (83% do total). No período, vale ressaltar a redução da participação do consumo de compensados no total, em termos tanto relativos quanto absolutos (Figura 2) (BIAZUS et al., 2010).

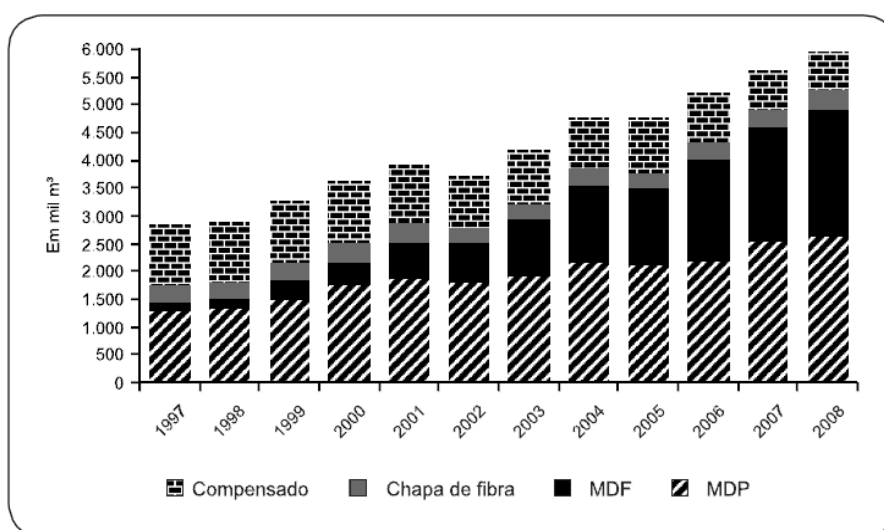


Figura 2: Evolução do consumo de painéis de madeira no Brasil.

Fonte: Abipa (2008) apud Biazus et al. (2010).

### 3.2. Matéria-prima

Os painéis de madeira aglomerada produzidos industrialmente apresentam em sua composição basicamente a madeira, o adesivo e os aditivos químicos como parafina e catalisador, que tem a função de acelerar o processo de cura do adesivo. No entanto, além das matérias-primas citadas procurou-se embasar o presente estudo a partir de trabalhos que também utilizaram a casca de eucalipto na composição do painel de partículas de madeira.

#### 3.2.1. Madeira

A madeira é um material instável. Suas propriedades físicas, químicas e mecânicas variam entre as espécies, dentro de uma mesma espécie e podendo variar inclusive na mesma árvore.

Devido às limitações existentes na madeira, e também visando um maior aproveitamento, iniciou-se a realização de pesquisas buscando uma alternativa para o uso da

madeira sólida. Uma das opções desenvolvidas é à produção de painéis à base de madeira, os quais possibilitam o aproveitamento de resíduos da indústria madeireira, fato que se encontra em constante evidência atualmente (MADEIRA TOTAL, 2008).

Várias espécies de madeira podem ser utilizadas para fabricação de um painel de madeira aglomerada. No Brasil as espécies mais utilizadas são as variações de pinus, de eucalipto e a Acácia negra. Os parâmetros que devem ser considerados na escolha da espécie de madeira são: a densidade da madeira, acidez, extrativos e materiais estranhos.

Atualmente, a indústria de painéis de madeira aglomerada em sua grande maioria utiliza a espécie de eucalipto na produção das chapas, em especial *Eucalyptus grandis*. Eucalipto, palavra proveniente da língua grega, significa verdadeira cobertura, é a designação vulgar das várias espécies vegetais do gênero *Eucalyptus*, pertencente à família das mirtáceas que compreende outros 130 gêneros. O plantio sistemático de eucalipto foi iniciado nas três primeiras décadas do século XIX e disseminou-se como a espécie florestal mais plantada do mundo, ao longo do século seguinte. No Brasil, a cultura de eucalipto teve início nos primeiros anos do século XX, apesar de sua introdução inicial datar do século anterior, quando a planta era utilizada como quebra-ventos, para fins ornamentais, e na extração de óleo vegetal. No fim da década de 1930, o eucalipto já era plantado em escala comercial, sendo utilizado como dormentes para construção (de casas e estradas de ferro) e combustível (para siderurgia e fornos domésticos). Atualmente, existem mais de 700 espécies de eucalipto catalogadas, sendo *Eucalyptus saligna*, *E. grandis* e *E. urophylla* (e seu híbrido, o *E. urograndis*) as mais cultivadas no país (VITAL, 2007).

O *Eucalyptus grandis* que tem como característica densidade básica classificada como média, apresenta coloração “rosa avermelhada” e é de fácil trabalhabilidade, pois é uma madeira macia que não oferece muita resistência às serras e equipamentos de trabalho manuais, e isso se deve também a sua grã direita. Originário da Austrália, o *Eucalyptus grandis* possui altura de 44 a 55 metros e DAP (diâmetro à altura do peito) de 122 cm. Isso perfaz um intervalo de volume de 198 m<sup>3</sup> a 542 m<sup>3</sup>, dependendo da combinação de altura e diâmetro apresentada pela árvore (VITAL, 2007).

A porosidade é uma característica física muito importante na análise de parâmetros silviculturais, principalmente ao ataque de fungos e cupim (COSTA, 2006). Segundo Silva et al. (2004a) apud Costa (2006) a espécie *Eucalyptus grandis*, independentemente da idade,

mostrou-se altamente suscetível ao ataque por *Cryptotermes brevis*, apresentando resultados bastante semelhantes aos encontrados na madeira de *Pinus elliottii*.

Porém, as plantações de eucalipto têm estado no meio de grandes controvérsias e continuam a despertar acalorados debates quanto a seus impactos no meio ambiente, criticam-se os efeitos que a plantação causa no solo, água e a baixa diversidade observada em monoculturas.

Entretanto, as plantações de eucalipto estão presentes nas mais diversas regiões do mundo e toda atividade silvicultural, assim como outras atividades econômicas, podem causar impactos ambientais, tanto positivos como negativos, sendo que nenhum deles é inexorável, ou seja, podem ou não estar presentes de acordo com uma série de circunstâncias, tais como: as condições prévias de plantio, o regime hídrico da região, o bioma de inserção da atividade silvicultural, as técnicas de manejo empregadas, a integração da população local (VITAL, 2007).

Segundo Haselein et al. (2004) apud Costa (2006), o Brasil recebe os méritos de ser um dos líderes mundiais no desenvolvimento científico do gênero *Eucalyptus*. Destaca-se dentre as espécies o *E. grandis* como uma das mais plantadas no Brasil e no mundo, é considerada uma das espécies de madeira mais versáteis e indicadas para uso múltiplo.

A área de plantios de Eucalipto totalizou 4.754.334 hectares em 2010. Ressalta-se que a área plantada desse gênero continua em processo de expansão, porém em um ritmo menos acelerado, 5,3% ao ano. Minas Gerais é o estado com maior plantio, com 1,4 milhões de há, seguido de São Paulo com 1,045 milhões de ha (ABRAF, 2011).

### **3.2.1.1. Casca**

A casca é a cobertura exterior de toda a árvore, desde as raízes até o tronco e os ramos. Ela possui tecidos específicos para transportar a seiva orgânica elaborada pelas folhas, para armazenar substâncias energéticas e nutrientes minerais e para dar suporte e prover de resistência a matriz que ela ajuda a compor, que é a árvore. Os eucaliptos são conhecidos pela diversidade e beleza de suas cascas. Elas possuem diferentes modelos, texturas, desenhos e

cores. É mesmo possível se identificar com alguma precisão algumas espécies de eucaliptos pelo tipo da sua casca (FOELKEL, 2006?).

As cascas dos eucaliptos também têm utilidades valiosas à sociedade: servem como combustível, como cobertura morta ao solo, como adubo, para produção de carvão vegetal, além de fornecer fitoquímicos (óleos essenciais, taninos, compostos fenólicos, etc.). Os artesões de antigas civilizações, como dos dias de hoje, também as utilizam como base para pinturas e desenhos, pois algumas espécies permitem obter lâminas de casca de excelente textura para se pintar e desenhar (FOELKEL, 2006?).

A casca fica localizada na camada externa ao câmbio, recobre o tronco, galhos e raízes das árvores, corresponde de 10 a 15% do peso da árvore. A sua composição geralmente é feita de periderme ou cortiça, tem a função de proteção na árvore. Na sua composição química tem-se alto teor de extrativos (principalmente taninos), alto teor de minerais, baixo teor de lignina, celulose e hemiceluloses.

A casca na árvore tem funções de proteção e de fisiologia muitíssimo importantes. Como um manto protetor, ela cobre todo o tronco, os ramos e raízes, impedindo que o xilema fique exposto e sujeito ao ressecamento, ao ataque de fungos, insetos, etc. Para proteger o xilema, a casca possui alguns compostos tóxicos a insetos, fungos e pássaros. Eventualmente, eles podem também ser irritativos ou causar alergia aos humanos e animais (FOELKEL, 2006?).

Segundo o Setor de Química Celulose e Energia da ESALQ (1983), citado por Santiago (2007), a casca influencia muito nos processos industriais, por isso é importante determinar a porcentagem de casca sob o ponto de vista florestal e industrial (produção de celulose, chapas de madeira, energia, etc.). Através da metodologia clássica o teor de casca é determinado cubizando-se a madeira com e sem casca, segundo a Equação 1.

$$\%CV = \frac{V_c - V_s}{V_c} * 100 \quad (1)$$

Onde:

%CV é a porcentagem de casca em volume (%);

V<sub>c</sub> é o volume da amostra com casca (m<sup>3</sup>);

V<sub>s</sub> é o volume da amostra sem casca (m<sup>3</sup>).

Ainda, segundo o Setor de Química Celulose e Energia da ESALQ (1983) apud Santiago (2007), as diferentes espécies de *Eucalyptus* apresentam grande diversidade quanto ao tipo e quantidade de cascas. Na maioria dos casos, dentro da árvore, a porcentagem é elevada tendendo a decrescer em direção ao meio da árvore e aumentando para o topo. Algumas espécies, todavia mostram um modelo marcadamente crescente ou decrescente no sentido base-topo. A Tabela 4 abaixo ilustra os teores de casca em diferentes espécies de *Eucalyptus* e a Figura 3, ilustra a variação da porcentagem de casca no sentido base-topo para o *Eucalyptus grandis*.

Tabela 4: Teor de cascas de espécies de Eucalipto.

| Espécie              | Porcentagem de massa |        |        |
|----------------------|----------------------|--------|--------|
|                      | Média                | Máxima | Mínima |
| <i>E. grandis</i>    | 12,65                | 15,45  | 10,62  |
| <i>E. saligna</i>    | 14,19                | 16,25  | 11,25  |
| <i>E. globulus</i>   | 14,32                | 16,45  | 11,90  |
| <i>E. pellita</i>    | 25,61                | 32,08  | 16,39  |
| <i>E. gummifera</i>  | 29,53                | 40,40  | 22,46  |
| <i>E. microcarys</i> | 21,02                | 25,73  | 16,90  |
| <i>E. pilularis</i>  | 20,66                | 29,46  | 17,99  |
| <i>E. triantha</i>   | 23,09                | 30,27  | 17,80  |

Fonte: SCQE – Setor de Química, Celulose e Energia – ESALQ – USP (1983) apud Santiago (2007).

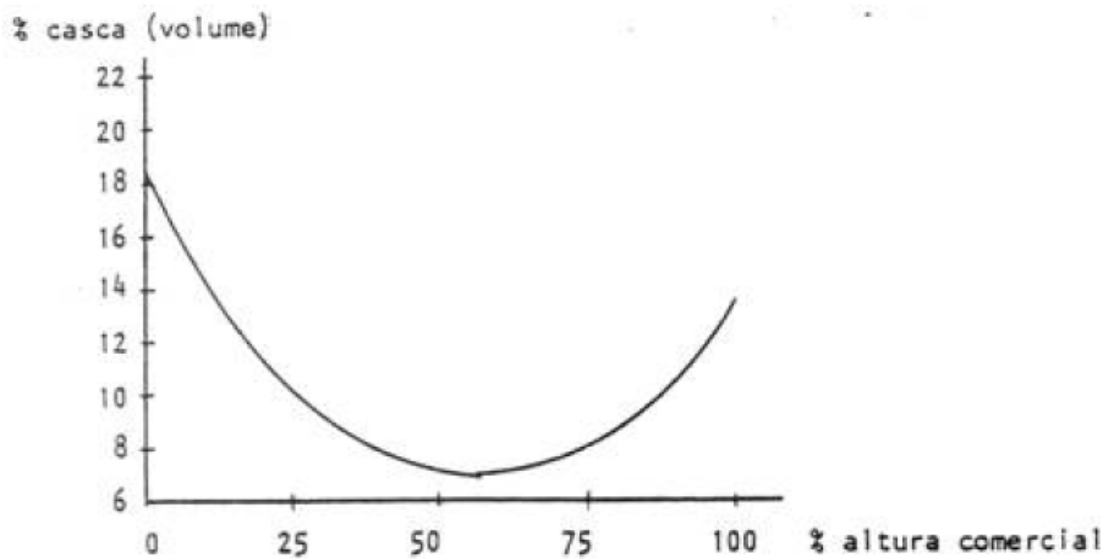


Figura 3: *Eucalyptus grandis*. Variação da porcentagem de casca no sentido base-topo.

Fonte: SCQE – Setor de Química, Celulose e Energia – ESALQ – USP (1983) apud Santiago (2007).

Segundo Foelkel [2006?], há diversos tipos de cascas dos eucaliptos, mas os mais comuns são os seguintes:

- Cascas lisas e brilhosas (Figura 4): a casca morta se solta e deixa exposta uma casca lisa e normalmente muito clara (*E.grandis*, *E.saligna*, *E.viminalis*, *E.globulus*, *E.camaldulensis*, *Corymbia citriodora*, *Corymbia maculata*, etc.);



Figura 4: Cascas lisas e brilhosas.

Fonte: Foelkel [2006?].

- Cascas esfoliantes (Figura 5): que se soltam em pequenos pedaços, lembrando pedaços de papel se desprendendo. Ocorrem em espécies de casca lisas, em determinadas épocas do ano (*E. grandis*);



Figura 5: Cascas esfoliantes.

Fonte: Foelkel [2006?].

- Cascas vermelhas ou sangrentas (Figura 6): na verdade são variantes também das cascas lisas, só que as cascas mortas que se soltam são de cores vermelha ou marrom muito intensas (*E. urograndis*, *Corymbia citriodora*);



Figura 6: Casca vermelha.

Fonte: Foelkel [2006?].

- Cascas permanentes: enrugadas, rugosas, suberosas e protuberantes, às vezes com aspectos de cordas ou de estrias (Figura 7). (*E. paniculata*, *E. acmenioides*, *E. obliqua*, *E. microcorys*);



Figura 7: Casca permanente enrugada.

Fonte: Foelkel [2006?].

- Cascas em forma de escamas (Figura 8): a casca externa não se solta, mas se rompe na forma de escamas ou de uma rede (*E.tessellaris*, *E.cloeziانا*).



Figura 8: Casca em forma de escamas.

Fonte: Foelkel [2006?].

Muitas espécies apresentam parte do tronco com um tipo de casca e parte com outro (por exemplo, *E. pilularis*, *E. urophylla*, *E. grandis*, *E. torelliana*). Nesses casos, o modelo mais comum é a parte superior da árvore, ou porque é mais jovem, ou porque já perdeu o ritidoma, apresenta o aspecto liso. A parte inferior ou da base, mais velha, mostra uma casca rugosa e que se desprende com muito mais dificuldade. Possivelmente, a árvore procura proteger mais a sua base contra as adversidades, como fogo, ataque de predadores, etc (FOELKEL,2006?).

A densidade básica da casca do eucalipto varia entre 0,24 até 0,40 g/cm<sup>3</sup> ( mais usual entre 0,30 e 0,35) e a da madeira entre 0,4 até 0,6 g/cm<sup>3</sup>. A menor densidade básica da casca, bem como seu tecido poroso, faz com que ela tenha mais espaço para reter água ou ar. Por isso, e também pela lavagem das toras nas operações industriais, a umidade da casca pode ser muito alta. Quanto mais baixa a densidade básica (Db), mais espaço existe como vazios para serem preenchidos por água. Uma madeira leve de densidade 0,45 g/cm<sup>3</sup> pode ter em sua saturação uma umidade de 61%; enquanto que uma madeira de densidade básica 0,60 g/cm<sup>3</sup> teria nessas mesmas condições umidade de 50%. Já uma casca de Db igual a 0,35 g/cm<sup>3</sup> conseguiria ter quase 70% de umidade ocupando seus espaços vazios na sua máxima capacidade de absorção, isso sem considerar a água nas superfícies que ela ainda poderia reter (FOELKEL,2006?).

A anatomia e a composição química das cascas dos eucaliptos são complexas. O conteúdo fibroso é baixo e a quantidade de células mortas é alta. Tudo isso, leva que a casca seja considerada mais um contaminante a ser separado, descartado ou utilizado, do que uma matéria prima valiosa para o processo (FOELKEL,2006?).

Segundo Foelkel [2006?], as cascas dos eucaliptos são constituídas de dois tipos de camadas ou regiões de células:

- Casca interna: quase que completamente viva, ativa e localizada imediatamente ao lado do câmbio vascular.
- Casca externa ou ritidoma: constituída de tecidos quase que completamente mortos em sua maioria. Forma uma barreira de proteção para prevenir danos que possam vir do meio ambiente.

### **3.2.2. Adesivo**

Os adesivos utilizados para a colagem de madeiras podem ser classificados em função de sua origem: adesivos naturais e sintéticos. Nesse segundo grupo ainda existe uma subdivisão de adesivos termoplásticos e termoendurecedores (IWAKIRI et al., 2005).

Os adesivos de origem sintética são mais utilizados atualmente, principalmente quando a utilização acontece em nível industrial, devido às propriedades de resistência à umidade e imunidade ao ataque de microorganismos e, especialmente, pelo fato da cura ser irreversível.

#### **3.2.2.1. Adesivos termoplásticos**

Os adesivos termoplásticos são aqueles adesivos que podem ser amolecidos com o calor e endurecidos com resfriamento. Estes adesivos baseiam-se no cloreto polivinílico e poliacetato de vinila. O principal adesivo termoplástico empregado para a colagem de madeira é o PVA (poliacetato de vinila), o qual é muito empregado na manufatura de móveis, colagem de lâminas e junções dos componentes em serviços de marcenaria e carpintaria em geral (IWAKIRI et al., 2005).

#### **3.2.2.2. Adesivos termoendurecedores**

Os adesivos termoendurecedores são aqueles que possuem capacidade de se solidificar através de reações químicas ativadas por calor ou catalisadores, resultando em uma colagem resistente à umidade, e ao aumento de temperatura. Essa classe de adesivos é representada, principalmente, por resinas à base de formaldeído (IWAKIRI et al., 2005).

Existem vários tipos de adesivos para fabricação de painéis reconstituídos de madeira, os mais utilizados na produção de painéis aglomerados são: Uréia-formaldeído, Fenol-formaldeído, Melamina-formaldeído.

- Uréia-formaldeído (UF):

É o adesivo mais utilizado na produção de aglomerados que se destinam ao uso interno. Tem um custo menor, facilidade de manuseio, cura rápida e são incolores, não conferindo cor desfavorável à superfície do painel (IWAKIRI et al., 2005).

- Fenol-formaldeído (FF):

Um adesivo de uso externo, com coloração marrom avermelhado, e pH na faixa de 11 a 13. É utilizado em menor escala, sendo destinado à produção de painéis estruturais que requerem alta resistência à umidade, tais como OSB e “waferboard” (IWAKIRI et al., 2005).

- Melamina-formaldeído (MF):

Em função do seu alto custo, esse adesivo pode ser utilizado como fortificante, em mistura com a uréia-formaldeído, na proporção de 10 a 40%. A combinação melamina-uréia-formaldeído confere aos painéis uma maior resistência à água, por isso seu uso destina-se para casos onde se deseja melhorar a estabilidade dimensional das chapas (IWAKIRI et al., 2005).

Porém, existem outros adesivos que estão sendo testados, dentre estes, o mais conhecido é a resina poliuretana. Dentre as resinas poliuretanas pode-se destacar o adesivo à base de mamona. Esse adesivo alternativo é proveniente do óleo extraído da planta mamona (*Ricinus communis*), o qual é facilmente encontrada na maioria das regiões do Brasil, devido a ser característica de regiões tropicais e subtropicais. A competitividade desse adesivo em relação a outros polímeros existentes está, além das propriedades mecânicas, no fato de ser originário de matéria-prima natural e renovável, aos preços razoáveis dos di-isocianatos disponíveis no país, e por não ser agressivo nem ao homem, nem ao meio ambiente (DIAS, 2005).

Na produção de chapas de partículas o adesivo representa o maior custo envolvido no processo, devendo ser otimizada a quantidade de aplicação do mesmo em função das propriedades requeridas e da finalidade a que a chapa se destinará (IWAKIRI et al., 2005). Segundo Mendes et al. (2000) no processo produtivo de algumas chapas, o custo com matéria-prima e adesivos pode vir a superar 50% de todo custo envolvido no processo, como mostrado na Figura 9.

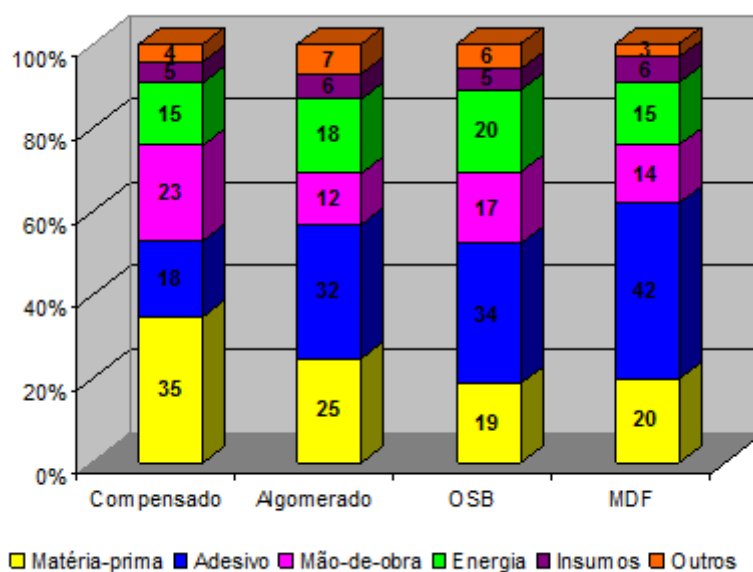


Figura 9: Custo de produção de alguns painéis.

Fonte: Mendes, 2000.

A quantidade de adesivo a ser utilizada na fabricação de uma chapa é determinada em função da quantidade de sólido resinoso e com base no peso seco das partículas (IWAKIRI et al., 2005).

### 3.2.3. Aditivos

Os aditivos químicos são produtos químicos incorporados nas partículas de madeira durante o processo de aplicação do adesivo, com a finalidade de melhorar algumas propriedades específicas do painel (IWAKIRI et al., 2005).

Segundo Iwakiri et al. (2005), alguns dos aditivos utilizados são:

- Catalisador ou endurecedor: tem a função de reativar a pré-condensação e aumentar a velocidade de polimerização e cura da resina, reduz o pH da resina.
- Emulsão de parafina: reduz a higroscopicidade das partículas de madeira e melhora a estabilidade dimensional dos painéis. É aplicado na proporção de até 1% do peso do sólido resinoso.

- Retardantes de fogo: alguns autores dizem que diminui a resistência dos painéis colados com resina uréia-formaldeído.
- Produtos preservantes: somente o aumento na quantidade de resina uréica de 4 a 8% é capaz de dobrar a resistência do painel ao ataque biológico. Produtos a base de boro também são utilizados para melhorar a resistência ao ataque de fungos e tem eficiência razoável ao ataque de insetos, contra o ataque de insetos xilófagos é recomendável a utilização de piretróide e hexaclorociclohexano.

#### **3.2.4. Resíduo**

Resíduo é todo material descartado nas cadeias de produção e consumo que por limitações tecnológicas ou de mercado, na apresenta valor agregado, e ainda pode causar impactos negativos ao ambiente quando manejado de maneira imprópria (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB, 1985).

Resíduo florestal é todo e qualquer material resultante da colheita ou processamento da madeira e/ou de outros recursos florestais que permanece sem utilização definida ao longo do processo, sendo descartado durante a produção (NOLASCO, 2000).

O aproveitamento da matéria-prima tem sido a grande preocupação das indústrias de processamento mecânico da madeira. Nos países onde estas indústrias estão bem desenvolvidas, a utilização dos resíduos gerados durante o processamento é intensa, principalmente para a produção de celulose, chapas de partículas aglomeradas e energia (NOLASCO, 2000).

No entanto, uma série de fatores acaba por dificultar este aproveitamento. Entre esses, pode-se destacar a distância entre as áreas geradoras de resíduos e aquelas onde se localizam as indústrias com potencial de aproveitamento, a dificuldade de manipulação do material, a falta de uniformidade, a dispersão espacial, a sazonalidade, o estado físico, a contaminação e falhas de manejo.

Os resíduos florestais (cascas, folhas, galhos, etc.) gerados pelas empresas de diversos segmentos industriais de base florestal não têm sido aproveitados corretamente devido ao desconhecimento ou à inexistência de tecnologias disponíveis a serem transferidas. Assim

sendo, têm sido utilizados de forma menos valorizada, como na queima direta em sistemas de geração de energia. A quantidade de resíduos oriundos das indústrias madeireiras e de resíduos da exploração florestal é bastante elevada, embora a utilização de resíduos na indústria nacional ser ainda em pequena escala. Alguns trabalhos de pesquisa têm demonstrado a viabilidade de utilização dos mesmos, e ressaltam a necessidade do melhor aproveitamento da matéria-prima (material lignocelulósico) e uso racional dos recursos florestais (BRITO, 1995; IWAKIRI, et al. 2000).

A preocupação em utilizar economicamente os resíduos provenientes da exploração florestal está presente em muitos centros de pesquisa (MATTOS, 2004).

Estados Unidos (2000) apud Mattos (2004) apresentam várias opções de uso, desde componente estrutural, matéria-prima para fabricação de papel, laminação, compostos fibra/plástico, entre outros.

### **3.3. Painéis à base de madeira**

Os painéis à base de madeira são uma alternativa para a substituição da madeira em algumas aplicações por apresentarem uma estrutura mais homogênea e livre de defeitos, com isso garantem melhores propriedades físico-mecânicas, estabilidade dimensional e resistência à biodeterioração.

Os painéis são estruturas fabricadas com madeiras em lâminas ou em diferentes estágios de desagregação, aglutinadas pela ação de pressão e temperatura, com o uso de resinas em alguns casos. Esse tipo de produto substitui a madeira maciça em diferentes usos, como na fabricação de móveis e pisos. Os painéis surgiram, principalmente, para atender a uma necessidade gerada pela escassez e pelo encarecimento da madeira maciça (MATTOS, 2008).

Os painéis de madeira podem ser divididos em três classes principais: painéis de lâminas, painéis de fibras e painéis de partículas (YOUNGQUIST, 1999).

#### **1. Painéis de lâminas de madeira (YOUNGQUIST, 1999):**

- Chapa de madeira compensada – *Plywood*: A chapa de madeira compensada pode ser definida como um painel de lâminas perpendiculares, cruzadas entre si, defasadas de 90° umas das outras.

- Chapa de lâminas paralelas – *Laminated Veneer Lumber*: A chapa de lâminas paralelas, ou LVL, é um painel composto por lâminas de madeira orientadas todas em um único sentido.
- Chapa de compensado sarrafeado: Consiste em um painel constituído por sarrafos na parte central, colados lateralmente, e revestido por lâminas, formando uma capa e contracapa. O sentido das fibras da contracapa é perpendicular às fibras do miolo de sarrafos e da capa.

2. Painéis de fibras de madeira (YOUNGQUIST, 1999):

- Chapa dura – *Hardboard*: São chapas de fibras de alta densidade, com espessura fina e homogênea, produzidas a partir da mistura de fibras com resinas sintéticas, e prensagem a quente. Sua produção pode se dar por processo a úmido ou a seco.
- Chapa de fibra de média densidade – *Medium Density Fiberboard*: São chapas homogêneas, uniformemente estáveis, com superfície plana e lisa garantindo excelente trabalhabilidade e usinabilidade, com densidade entre 500 e 800 kgf/m<sup>3</sup>.
- Chapa isolante – *Insulation board*: São chapas com densidade entre 160 e 500 kgf/m<sup>3</sup> as quais se caracterizam por ainda serem produzidas por processo úmido. Atualmente, são fabricadas principalmente com madeira de eucalipto, de reflorestamento.

3. Painéis de partículas de madeira (YOUNGQUIST, 1999):

- Chapa de partículas aglomeradas – *Particleboard*: Corresponde às chapas comumente conhecidas por “aglomerado”, pois é formada por pequenas partículas unidas por adesivo e prensadas a quente.
- Chapa de partículas não orientadas – *Waferboard*: São chapas formadas por partículas dispostas aleatoriamente, formando uma camada homogênea, possuindo a vantagem de ter um processo de fabricação muito simples. No entanto, possuem a desvantagem de possuir propriedades mecânicas inferiores a outras chapas, como por exemplo, o OSB.
- Chapa de partículas orientadas – *Oriented Strand Board*: Uma chapa composta por camadas de partículas orientadas, longas, largas e de espessura fina, unidas por adesivo e prensadas a quente. É sempre formada por um número ímpar de camadas, sendo cada

uma disposta perpendicularmente à outra. Este painel é muito utilizado para fins estruturais.

A seguir será abordado de forma mais detalhada o painel de madeira aglomerada, tema desta pesquisa.

### **3.3.1. Aglomerados**

O painel de partículas, comumente chamado de aglomerado, é um painel produzido com partículas de madeira, com a incorporação de um adesivo sintético e reconstituídos numa matriz randômica e consolidados através da aplicação de calor e pressão na prensa quente. Outros materiais lignocelulósicos podem ser utilizados na fabricação de aglomerados (IWAKIRI et al., 2000).

Segundo Haselein et al. (2002), os painéis de aglomerado são produzidos dos mais variados materiais, aos quais se adiciona um adesivo e, por meio de um processo de prensagem das pequenas unidades, forma-se uma peça única. As chapas aglomeradas, geralmente, são produzidas com resinas sintéticas e os métodos de produção exigem gastos significativos com aquecimento na prensagem e gastos de energia para a secagem das partículas.

Segundo Iwakiri et al. (2005), através de seu processo de fabricação, esta chapa apresenta algumas vantagens em relação à madeira serrada:

- Eliminação dos efeitos de anisotropia presentes na madeira;
- Apresenta resistência similar nos sentidos de largura e comprimento;
- Possibilita a eliminação de fatores responsáveis por reduzir a resistência, como nós, lenhos juvenil e adulto, etc;
- Permite o controle das propriedades físico-mecânicas da chapa através de variáveis do processo, como adesivo, geometria das partículas, grau de densificação, etc;
- Menor exigência quanto à matéria-prima, em termos de diâmetro de toras, conicidade do fuste, etc;
- Menor custo de armazenamento.

Porém, a utilização de partículas ao invés de madeira serrada, apresenta uma desvantagem, pois o volume a ser transportado é muito grande e sua densidade é baixa. Com isso o custo para realização do transporte acaba se elevando. O ideal é que as partículas não necessitem serem transportadas a longas distâncias.

A madeira utilizada para produção de painéis aglomerados é proveniente de plantios florestais, podendo ser de pinus, eucalipto e algumas utilizam as espécies citadas em proporções variáveis. O adesivo mais utilizado é a resina sintética uréia-formaldeído, já que o fenol-formaldeído pode ser empregado em casos excepcionais e muito menos usuais (chapas resistentes à umidade), acarretando em maiores custos produtivos. Além da resina, outros aditivos são misturados, como emulsão de parafina, retardantes de fogo e biocidas preservantes para melhorar algumas características do produto final (MACIEL et. al., 2004).

Os painéis de partículas podem ser classificados de acordo com o tipo das partículas, pela sua densidade, ou pelo seu processo de distribuição.

As partículas podem ser divididas em:

- Partículas do tipo “*Sliver*”: partículas como serragem e pó de serra;
- Partículas do tipo “*Flake*”: partículas como as maravalhas;
- Partículas do tipo “*Wafer*”: partículas como lascas e cavacos.

De acordo a NBR 14810-2 (2006) os painéis podem ser classificados em média densidade quando a mesma está entre 0,55 e 0,75 g/cm<sup>3</sup>.

Outra classificação que pode ser realizada é quanto à distribuição do material durante o processo de fabricação pode acontecer de quatro formas: homogêneas, em múltiplas camadas, em camadas graduadas e de forma orientada (IWAKIRI, 2005).

Dependendo da formação do colchão, a chapa pode ser classificada como uma chapa homogênea, multicamadas e camadas graduadas, como mostra a Figura 10.

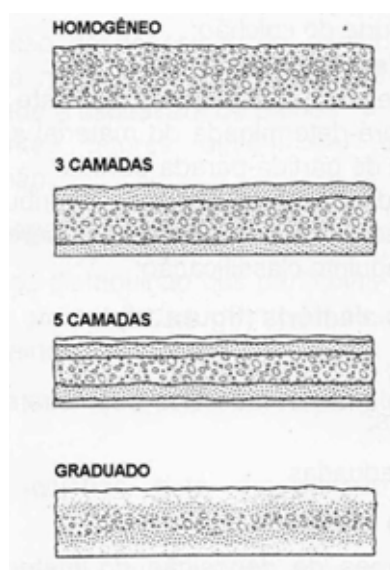


Figura 10: Disposição das partículas nos diferentes tipos de chapas.

Fonte: Iwakiri et al., 2005.

O painel conhecido como MDP (*Medium Density Particleboard*), tem quase a mesma definição do aglomerado convencional explicada, com a diferença de que nas camadas externas as partículas de madeira são menores proporcionando um melhor acabamento superficial e melhor trabalhabilidade e, na camada interna as partículas são maiores.

O MDP é um painel que tem como precursor a chapa de madeira aglomerada. Pode ser considerado uma evolução do aglomerado em termos de processo produtivo e qualidade do produto final. As partículas são posicionadas de maneira diferente, com as maiores dispostas na região central do painel e as mais finas nas superfícies externas formando três camadas. As partículas são aglutinadas e compactadas entre si com resina sintética através da ação conjunta de pressão e calor em prensa contínua.

Esta nova tecnologia empregada no processo proporcionou melhora na distribuição das camadas de partículas de madeira, resultando em um painel com maior estabilidade dimensional, mais homogêneo, com maior durabilidade e resistência e menor custo final.

### 3.4. Processo de produção industrial das chapas de partículas aglomeradas

O processo de produção industrial das chapas de partículas aglomeradas envolve as seguintes etapas apresentadas na Figura 11.

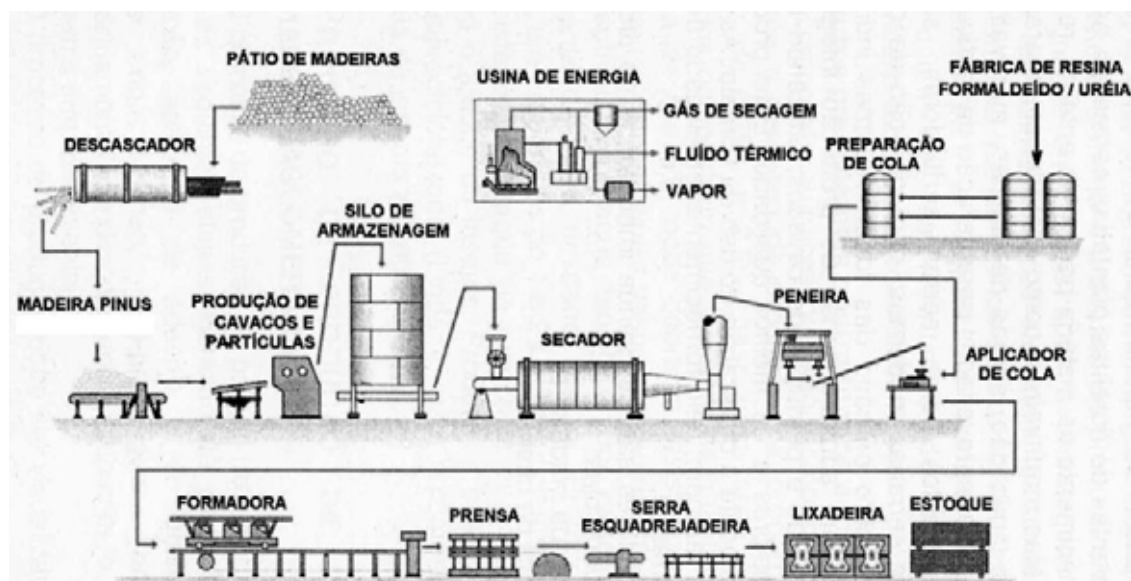


Figura 11: Processo de produção de chapas de partículas aglomeradas.

Fonte: Iwakiri, 2005.

#### 3.4.1. Geração das partículas

As toras são a principal base de fornecimento de matéria-prima na produção de painéis. No entanto, resíduos de outras indústrias madeireiras, como costaneiras, aparas, pontas, rolo resto de laminação, aparas de lâminas, maravalhas, entre outros, podem ser aproveitados para geração de partículas (IWAKIRI et al., 2005).

Dois fatores são muito importantes nessa etapa do processo: a umidade da madeira e a presença de casca. A umidade pode variar bastante no pátio de armazenamento de matéria-prima devido a mudanças climáticas nas estações do ano, porém umidades abaixo de 35% dificultam o controle da geometria das partículas, gerando maior quantidade de finos, maior

consumo de energia e desgaste de facas dos picadores. Já para umidades muito elevadas pode haver o esmagamento da madeira. A literatura menciona então uma faixa adequada de umidade da madeira entre 35 e 50% (IWAKIRI et al., 2005).

Antes da geração das partículas, é feito o descascamento da tora. Só então é feita a redução primária da matéria-prima através de picadores que transformam as toras em cavacos. Para a transformação de cavacos em partículas menores (redução secundária) utiliza-se o moinho de martelo. Mas existem também outros equipamentos para obtenção de partículas (IWAKIRI et al., 2005).

Segundo DIAS (2005) o processo de geração de partículas é a fase em que se definem elementos dimensionais das partículas (comprimento, largura e espessura).

#### **3.4.2. Secagem das partículas**

A determinação do teor de umidade das partículas é decisiva na melhoria das propriedades do painel. Esse teor de umidade influencia diretamente na cura da resina, no tempo de prensagem e na pressão necessária para consolidação do painel até a espessura final desejada (BARROS FILHO, 2009).

Essa etapa é de grande importância, pois o teor de umidade das partículas influencia na colagem, no tempo e pressão necessária a prensagem. No processo industrial, as partículas devem estar secas no teor de umidade abaixo de 3%, tentando diminuir o tempo e o custo dessa secagem. O teor de umidade inicial das partículas é importante no controle da umidade final; partículas com umidade acima do recomendado podem formar bolhas de vapor durante a prensagem, e com umidade abaixo do recomendado podem secar demais e colocar em perigo de combustão e incêndio no secador.

O tempo de secagem varia de acordo com a densidade da madeira, espessura das partículas e umidade inicial e final das partículas. Esse tempo pode variar de 1 a 3 minutos dependendo das variáveis acima (IWAKIRI et al., 2005).

### **3.4.3. Classificação das partículas**

Segundo Dias (2005) o processo de geração de partículas é a fase em que se definem elementos dimensionais das partículas (comprimento, largura e espessura).

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

Após a secagem, as partículas são classificadas através de peneiras ou em função de seu peso, essa classificação é feita para que os finos sejam removidos. As partículas maiores são destinadas para a camada interna do painel e as menores para as camadas externas (IWAKIRI et al., 2005).

### **3.4.4. Aplicação do adesivo**

O adesivo, como já foi visto, representa um alto custo na produção dos painéis de partículas. Em torno de 35% do custo total do painel, podendo chegar a um custo maior se o material não for melhor otimizado.

A quantidade de adesivo aplicado é normalmente de 6 a 12% em relação ao peso das partículas secas, e a homogeneidade da distribuição deste sobre a superfície das partículas, assegurando assim propriedades uniformes ao painel (BARROS FILHO, 2009).

Os fatores mais importantes durante a aplicação do adesivo são: controle da quantidade de adesivo a ser aplicado, que é normalmente de 6 a 12% em relação ao peso seco das partículas; e a homogeneidade quanto à distribuição de adesivo sobre a superfície das partículas, de forma a assegurar propriedades uniformes sobre toda a extensão do painel (IWAKIRI et al., 2005).

A aplicação do adesivo sobre as partículas é realizada no mesmo aplicador quando os painéis são homogêneos, porém se os painéis forem multicamadas ou graduados, a aplicação do adesivo é realizada separadamente para partículas da camada interna e das camadas externas do painel, em dois aplicadores distintos. Nas camadas externas, onde a dimensão da partícula é

menor, é aplicada uma quantidade maior de adesivo, pois as partículas têm uma maior área superficial específica (IWAKIRI et al., 2005).

#### **3.4.5. 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 (DIAS, 2005).

A formação do colchão é o processo de deposição das partículas com adesivo sobre uma esteira móvel, em quantidade pré-determinada em função da densidade e espessura do painel. O equipamento formador do colchão é chamado de estação formadora, nele há um reservatório onde é dosado o material que vai para o sistema de distribuição sobre a esteira móvel (IWAKIRI et al., 2005).

E segundo Olmos (1992) apud Dias (2005), 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.

Segundo Iwakiri et al. (2005), vários fatores devem ser considerados na formação do colchão:

- Densidade e espessura desejada do painel;
- Uniformidade de distribuição das partículas para assegurar a densidade e propriedades homogêneas sobre todo o painel;
- Arranjo do material;
- Altura do colchão, que está em função dos parâmetros: densidade do painel, densidade da madeira e espessura do painel.

### 3.4.6. Pré-prensagem do painel

Após a formação do colchão, a chapa passa pela pré-prensagem que tem como objetivo reduzir a altura do colchão, melhorar a sua consistência e facilitar o carregamento da prensa quente (IWAKIRI et al., 2005).

O colchão de partículas já está formado, porém não pode ser prensado, pois existe uma grande quantidade de ar entre as partículas. Para isto é utilizado um equipamento conhecido como pré-prensa, que consiste na aplicação de pressão através de uma esteira perfurada, fazendo com que o ar seja expulso, facilitando assim a prensagem e evitando defeitos, como sopro de prensa. O controle da pré-prensa é efetuado através da abertura de quatro pistões, sendo dois na entrada e dois na saída. O operador em função da espessura desejada modifica os *setpoints* em mm (controladores) na entrada esquerda, entrada direita, saída esquerda, saída direita, sendo possível visualização da pressão em bar (MALONEY, 1993).

A Figura 12 ilustra o funcionamento da pré-prensa:

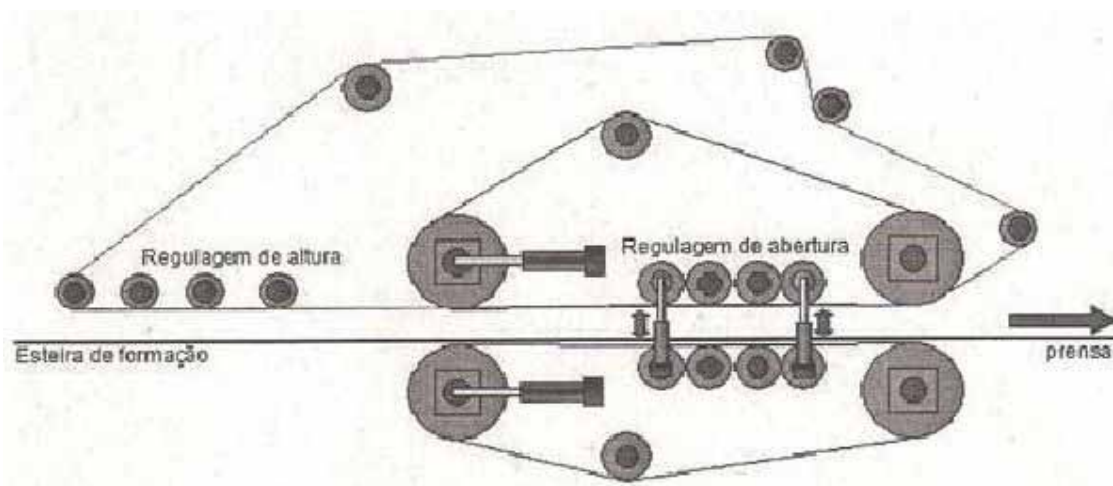


Figura 12: Pré-prensa.

Fonte: Maloney, 1993.

### 3.4.7. Prensagem do painel

Após a pré-prensagem, o painel vai para a prensa a quente, que tem como objetivo a cura da resina, a classificação e consolidação do colchão até a espessura final do painel. Os parâmetros do ciclo de prensagem de acordo com Iwakiri et al. (2005) são:

- Pressão: tem as funções de densificação e consolidação do material, até atingir a espessura final do painel. A pressão a ser aplicada está relacionada com as variáveis: área de contato entre as partículas, densidade do painel, controle da espessura do painel, transferência de adesivo entre a superfície das partículas e tempo de fechamento da prensa. A pressão aplicada pode variar na faixa de 12 a 40 kgf/cm<sup>2</sup>, em função do grau de densificação do material;
- Temperatura de prensagem: tem a função de processar a polimerização e cura da resina, e de plasticização da madeira, reduzindo a resistência da madeira à compressão e facilitar a consolidação do colchão até a espessura final do painel. A transferência de calor no painel começa a partir do contato entre os pratos quentes da prensa com a superfície do colchão, então ocorre a evaporação da umidade nas camadas superficiais e penetração do vapor para as camadas mais internas do painel, nesta região onde a temperatura é mais baixa ocorre a condensação desse vapor e conseqüente transferência de calor. A temperatura de prensagem é definida de acordo com a temperatura necessária para a cura da resina, para a resina uréia-formaldeído a temperatura é de aproximadamente 18 °C, e para a resina fenol-formaldeído é de 200 a 220 °C;
- Tempo de fechamento da prensa: é o momento desde o contato dos pratos quentes da prensa com a superfície do colchão até atingir a espessura final do painel. Está relacionado com a formação do gradiente vertical de densidade do painel;
- Tempo de prensagem: é o tempo transcorrido a partir do momento da consolidação do colchão de partículas à espessura final do painel até a abertura dos pratos da prensa. O tempo de prensagem deve ser suficiente para que o centro do painel atinja a temperatura suficiente para a cura da resina, está em função da espessura da chapa, umidade do colchão e temperatura de prensagem.

### 3.4.7.1. Prensas

Prensas podem ser divididas em prensas descontínuas (multi-aberturas e de única abertura) e prensas contínuas. Prensas de aberturas múltiplas foram as mais usadas no início da década de 90 por indústrias. Porém prensas contínuas estão sendo instalados em todo o mundo com o desenvolvimento de um sistema para fazer placa fina. Prensas para placas mais grossas estão agora em funcionamento, embora tenham sido desenvolvidos na década de 1950 (MALONEY, 1993).

Os fatores importantes a se considerar ao avaliar os prós e contras de qualquer linha de prensa são a qualidade de painéis produzidos, a entrada de matéria-prima (madeira, resina, energia) em relação à quantidade produzida de painéis, o tempo necessário para a manutenção, mudando de paradas ou dispositivos de controle de espessura, limpeza, bem como a duração da programação as vezes que se pode esperar.

Inicialmente as prensas foram adaptadas da indústria de madeira compensada, porém não eram adequadas para pressionar painéis de fibras e aglomerados (MALONEY, 1993).

O desenvolvimento da indústria tornou possível a construção de prensas para a produção de tamanhos de placa maior.

Antigamente o tipo de prensagem a quente mais utilizado era do tipo prato, a discriminação ainda é utilizada, porém de duas formas: multi-abertura e de única abertura como mostrado nas Figuras 13 e 14. Esses tipos de prensas são descontínuas em que os colchões são introduzidos na prensa e são mantidas lá durante a operação de prensagem (MALONEY, 1993).

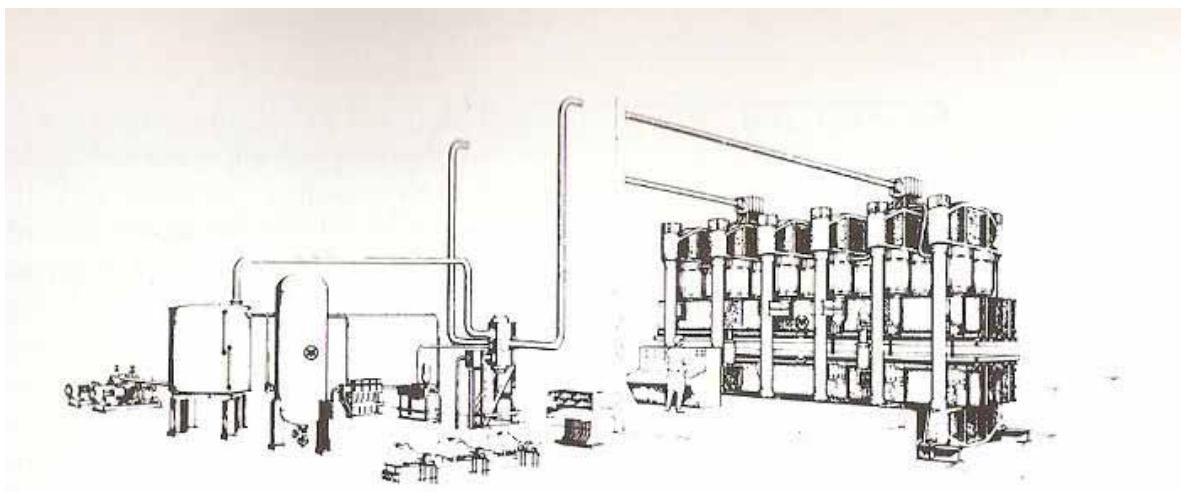


Figura 13: Prensa de abertura simples.

Fonte: MALONEY, 1993.

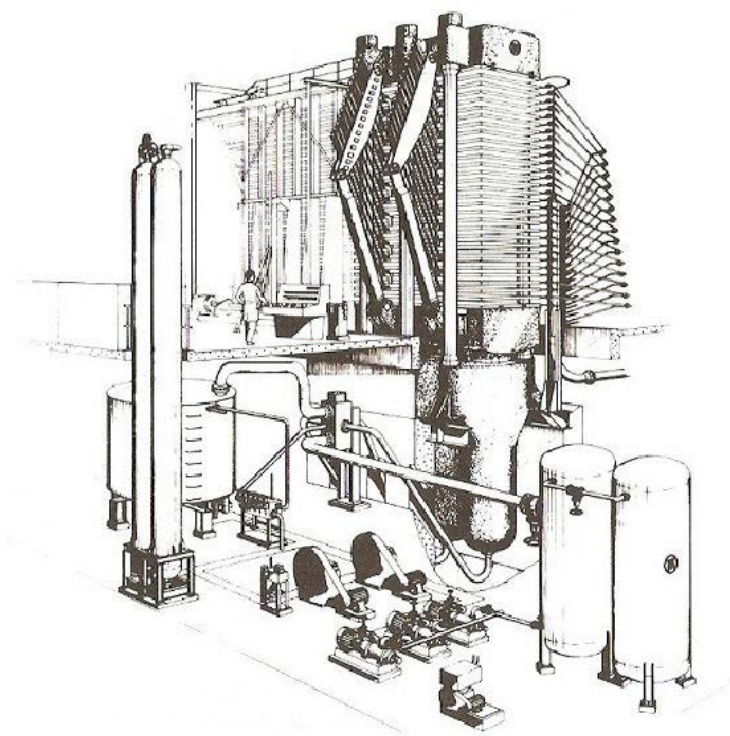


Figura 14: Prensa de múltiplas aberturas.

Fonte: Maloney, 1993.

#### **3.4.8. Acabamento dos painéis**

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 (DIAS, 2005).

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 (DIAS, 2005).

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais e métodos utilizados serão descritos a seguir, onde inicialmente serão detalhados os materiais utilizados, seguindo a metodologia para a fabricação e classificação físico-mecânica dos painéis com base em documento normativo.

O painel confeccionado apresentou o mesmo aspecto que o MDP com a particularidade de ter na camada interna partículas de casca de *Eucalyptus urograndis* e *Eucalyptus saligna*.

### 4.1. Materiais

As matérias-primas utilizadas neste trabalho foram:

- Peças residuais do processamento de *Eucalyptus sp* com densidade variando entre 0,6 e 0,9 g/cm<sup>3</sup>;
- Casca de *E. urograndis* e *E. saligna* e;
- Adesivo uréia-formaldeído.

A madeira utilizada para fabricação do painel foi doada uma parte pelo Laboratório de Máquinas e Engenharia da Madeira – ESALQ/USP – Piracicaba e parte pelo Laboratório de Processamento da Madeira da UNESP – Campus de Bauru.

A casca foi doada pela empresa Duratex, localizada no município de Itapetininga, São Paulo. A empresa produz painéis de MDP e apresenta este resíduo no seu processo.

O adesivo utilizado foi fornecido pela empresa Momentive Química do Brasil Ltda., localizada na cidade de Curitiba, Paraná.

## 4.2. Métodos

A fabricação dos painéis foi realizada no LaMEM – Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeiras – EESC/USP – São Carlos. As caracterizações físicas e mecânicas foram realizadas a partir das especificações de ensaios com base na norma ABNT 14810/2002 e foram realizados no Laboratório de Propriedades dos Materiais da UNESP – Campus de Itapeva.

Foram feitos quatro diferentes composições de painéis, onde variou-se a porcentagem de casca na camada interna do painel. O primeiro tratamento avaliado foi composto por 5% de casca e 95% de partículas de madeira, o segundo tratamento com 10% de casca e 90% de madeira, o terceiro com 15% de casca e 85% de madeira e por fim o quarto tratamento com 20% de casca e 80% de madeira. A Tabela 5 indica a quantidade de massa de casca e madeira presente em cada tratamento, todos os valores da Tabela 5 estão em gramas.

Tabela 5: Massa de casca e de madeira em gramas utilizada em cada situação, onde (CI) significa camada interna e (CE) é camada externa.

| <b>Tratamento</b> | <b>Massa de casca (CI)</b> | <b>Massa de mad. (CI)</b> | <b>Massa de mad. (CE)</b> |
|-------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|
| <b>1</b>          | 35                         | 665                       | 700                       |
| <b>2</b>          | 70                         | 630                       | 700                       |
| <b>3</b>          | 105                        | 595                       | 700                       |
| <b>4</b>          | 140                        | 560                       | 700                       |

A utilização da casca neste trabalho buscou apresentar uma aplicação viável economicamente e ambientalmente, minimizando o impacto ambiental causado por estes resíduos quando lançados de maneira aleatória no meio e ainda agregar valor a um material que geralmente é descartado.

#### 4.2.1. Equipamentos utilizados na confecção do painel

Os equipamentos utilizados neste trabalho encontram-se no LaMEM e nos laboratórios da UNESP – Campus de Itapeva.

Na primeira etapa do processo de fabricação das chapas, foram utilizados os equipamentos: Picador Laboratorial da marca Marconi, modelo MA 683/3 (Figura 15), o Moinho da marca Marconi (Figura 16) e o Agitador de Peneiras para Análises Granulométricas Eletromagnético da marca Bertel (Figura 17), equipamentos disponíveis no Laboratório de Processamento da Madeira, no Laboratório de Propriedades dos Materiais e Laboratório de Fluidotérmica, ambos no Campus de Itapeva.



Figura 15: Picador laboratorial.



Figura 16: Moinho.



Figura 17: Agitador de Peneiras para Análises Granulométricas Eletromagnético.

Depois, utilizou-se uma prensa termo-hidráulica da marca Marconi (Figura 18), com capacidade máxima de 50 toneladas, este equipamento possui sensores em três posições distintas nos pratos que permitem maior controle e homogeneidade da temperatura de prensagem.



Figura 18: Prensa termo-hidráulica.

Foi ainda utilizada uma estufa para secagem e esterilização da marca Marconi, modelo MA033 (Figura 19) que trabalhou com uma temperatura em torno de 105°C. O equipamento apresenta sistemas de ventilação que podem ou não ser utilizados.



Figura 19: Estufa para Secagem e Esterilização.

O misturador de adesivo da marca Lieme e partículas (Figura 20) foi outro equipamento utilizado, é composto por um recipiente de aço inoxidável e batedor central.



Figura 20: Misturador de adesivo com as partículas.

Utilizou-se também uma pré-prensa (Figura 21), esse equipamento foi confeccionado por um dos técnicos do LaMEM. Este dispositivo tem a finalidade de reduzir a espessura e volume do painel.



Figura 21: Equipamento para a pré-prensagem à frio dos painéis.

E, finalmente, utilizou-se na confecção das chapas a prensa hidráulica termomecânica (Figura 18). Com o uso desse equipamento consegue-se efetivar a cura da resina através da aplicação de calor.

#### **4.2.2. Fabricação das chapas de partículas em laboratório**

As chapas foram compostas por três camadas, sendo utilizadas partículas de menor dimensão para as camadas externas e para a camada intermediária partículas de dimensão maior.

A madeira fornecida para fabricação da chapa foi processada em um picador (processamento primário) para transformá-la em cavacos e, posteriormente, em um moinho de facas para a obtenção das partículas. A classificação das partículas foi feita em um Agitador de Peneiras para Análises Granulométricas Eletromagnético da marca Bertel.

As partículas utilizadas na camada intermediária apresentaram dimensões de 1,7 a 3 mm e as partículas para a camada externa dimensões de 0,85 a 1,7 mm.

Para composição de uma chapa utilizou-se 1400 g de material, sendo metade empregado na camada interna e a outra metade nas camadas externas. A quantidade de casca e partículas na camada interna variou, em função das quatro diferentes porcentagens de casca na composição do painel.

A quantidade de adesivo utilizada foi baseada no peso do material que compunha a chapa. Utilizou-se 15% de adesivo com base no peso seco das partículas, o que corresponde a 210 g de uréia-formaldeído, essa quantidade foi utilizada devido às perdas de aproximadamente 3% nos instrumentos do laboratório. Também foi adicionado ao adesivo 1,5% (base peso do adesivo) de sulfato de amônia, correspondente a 3,15 g, para acelerar a cura da resina, e 1,5% de parafina (peso das partículas) que corresponde a 21 g, visando a impermeabilização das partículas. A mistura que compunha o adesivo totalizava um peso de 234,15 g. Desse valor total, metade foi utilizada na camada interna e a outra metade na camada externa.

Com as partículas já encoladas formou-se o colchão em uma forma de 40 x 40 cm (Figura 22).



Figura 22: Forma de madeira que acomoda as partículas.

Após a encolagem, o colchão foi pré-prensado a frio (Figura 21) com o objetivo de diminuir a espessura e facilitar o carregamento da prensa, sendo em seguida, levado à prensa a quente (Figura 18) por um período de 10 minutos, a uma temperatura de 130 °C e pressão de 34 kgf/cm<sup>2</sup> com um limitador de espessura de 10 mm. Os painéis prontos foram acondicionados ao ar até o término da cura da resina e resfriamento do painel. Na Figura 23 apresenta-se o aspecto final do painel.



Figura 23: Chapa de partículas pronta, antes de passar na serra esquadrejadeira.

Após a fabricação, as chapas foram processadas para a obtenção dos corpos-de-prova para a realização dos ensaios. O esquema de corte dos corpos-de-prova está apresentado na Figura 24, onde os corpos-de-prova numerados de 1 a 7 foram utilizados no ensaio de flexão; os quadrados maiores numerados de 8 a 17 foram utilizados nos ensaios de densidade, teor de umidade e adesão interna; e os quadrados menores com números de 18 a 33 foram utilizados nos ensaios de inchamento em espessura e absorção de água. Como existiam duas chapas para cada situação, houveram corpos-de-prova suficientes para realização dos ensaios.

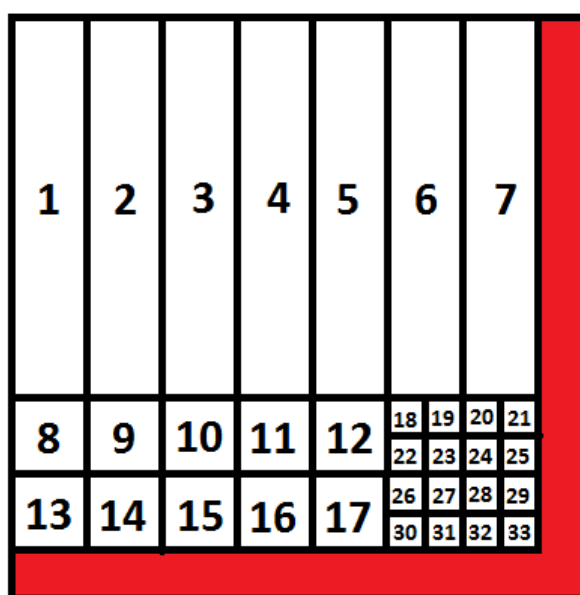


Figura 24: Esquema dos cortes dos corpos-de-prova. Em vermelho se encontra parte da chapa que não foi utilizada.

#### 4.2.3. Equipamentos utilizados nos ensaios físicos e mecânicos

Todos os ensaios mecânicos foram realizados na Máquina Universal de Ensaio da marca EMIC, com capacidade de carga de 30 toneladas do Laboratório de Propriedades dos Materiais da UNESP - Campus Itapeva (Figura 25).



Figura 25: Máquina universal de ensaios para realização de testes mecânicos.

Dispositivos de ensaios para a realização dos ensaios mecânicos de tração perpendicular (Figura 26) e para o ensaio de flexão estática (Figura 27).



Figura 26: Acessório utilizado no ensaio de adesão interna.

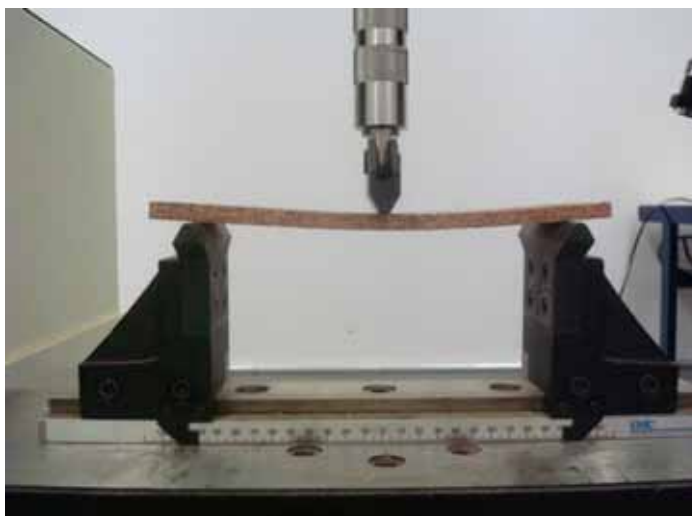


Figura 27: Acessório utilizado no ensaio de flexão.

Para a realização do ensaio de tração perpendicular, foi necessário colar os corpos-de-prova em “sapatas”, como mostrado na Figura 28. Foram utilizados dois tipos de cola, a cola epóxi “araldite 24 h” e o poliuretano à base de mamona.



Figura 28: Sapata de madeira e corpo-de-prova já colado nas sapatas.

Para os ensaios físicos foram utilizados os seguintes equipamentos: balança digital semi-analítica da marca Digimed, modelo KN4000 (Figura 29), estufa para secagem e esterilização da marca Marconi (Figura 19), que foi a mesma utilizada durante a confecção do painel e um paquímetro digital.



Figura 29: Balança digital semi-analítica.

#### **4.2.4. Ensaios físicos e mecânicos**

Com os corpos-de-prova já retirados, foram realizados os ensaios físicos e mecânicos como descritos nos itens a seguir, baseados na NBR 14810-3/2006.

##### **4.2.4.1. Determinação do teor de umidade**

A seguir estão descritas as características dos corpos de prova, a metodologia do ensaio e os cálculos para a determinação do teor de umidade.

#### **4.2.4.1.1. Corpos-de-prova**

Para realização dos testes para determinação da umidade das chapas de partículas de madeira aglomerada, são necessários 10 corpos-de-prova por chapa, com 50 mm de comprimento e 50 mm de largura cada.

#### **4.2.4.1.2. Procedimento**

Inicialmente os corpos-de-prova foram pesados individualmente para determinação da massa úmida e em seguida, foram colocados em estufa mantida a  $103 \pm 2$  °C até obter-se massa constante. Considerou-se a massa constante quando, passadas 4h da introdução na estufa, a massa não variou mais do que 0,1%.

Logo após a retirada da estufa, os corpos-de-prova foram esfriados em dessecador. E novamente pesados individualmente, para obtenção da massa seca.

#### **4.2.4.1.3. Cálculos e expressão dos resultados**

Para o cálculo da porcentagem do teor de umidade, utilizou-se a Equação 2.

$$U = \frac{MU - MS}{MS} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

U é a umidade residual do corpo-de-prova (%);

MU é a massa úmida do corpo-de-prova (g);

MS é a massa seca do corpo-de-prova (g).

O resultado obtido teve como referência a média dos corpos-de-prova analisados, expresso em porcentagem, com exatidão de 0,1%.

#### **4.2.4.2. Determinação da densidade**

A seguir estão descritas as características dos corpos de prova, a metodologia do ensaio e os cálculos para a determinação da densidade.

##### **4.2.4.2.1. Corpos-de-prova**

Para realização dos ensaios para determinação da densidade das chapas de partículas de madeira aglomerada, foram necessários 10 corpos-de-prova de 50 x 50 mm por chapa.

##### **4.2.4.2.2. Procedimento**

Após os corpos-de-prova terem sido devidamente identificados, mediu-se a espessura com precisão de 0,1 mm. A espessura foi medida em cinco pontos de cada corpo-de-prova, sendo um no centro e os demais nas extremidades como mostrado na Figura 30. Foram medidos também o comprimento e a largura, utilizando um paquímetro digital com precisão de 0,1 mm. E por fim, os corpos-de-prova foram pesados em balança com precisão de 0,1g.

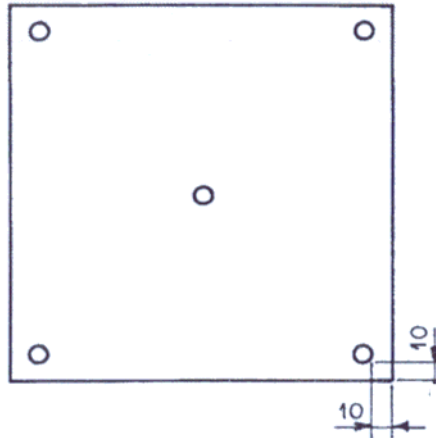


Figura 30: Pontos de medição no corpo-de-prova.

Fonte: NBR 14810-3 (2006).

Obs: Distância em milímetros.

#### 4.2.4.2.3. Cálculos e expressão dos resultados

O cálculo da densidade de um corpo-de-prova foi feito através das Equações 3 e 4.

$$D = \frac{M}{V} \cdot 10^6 \quad (3)$$

Sendo:

$$V = L \times C \times E \quad (4)$$

Onde:

$D$  é a densidade do corpo-de-prova ( $\text{kg/m}^3$ );

$M$  é a massa do corpo-de-prova (g);

$V$  é o volume do corpo-de-prova ( $\text{mm}^3$ );

$L$  é a largura do corpo-de-prova (mm);

$C$  é o comprimento do corpo-de-prova (mm);

$E$  é a espessura do corpo-de-prova (mm).

O resultado obtido foi a média das densidades dos corpos-de-prova ensaiados, expressos em  $\text{kg/m}^3$ , com exatidão de  $1 \text{ kg/m}^3$ .

#### **4.2.4.3. Determinação do Inchamento e absorção**

A seguir estão descritas as características dos corpos de prova, a metodologia do ensaio e os cálculos para a determinação do inchamento em espessura e da absorção de água.

##### **4.2.4.3.1. Corpos-de-prova**

O número de corpos-de-prova, para os ensaios de inchamento e absorção de água, conforme indicado na norma consultada, foram 10 amostras de 25 x 25 mm para cada uma das propriedades a ser avaliada.

##### **4.2.4.3.2. Procedimento**

Após ter sido cortado e identificado, mediu-se a espessura no centro do corpo-de-prova, com uma precisão de 0,01 mm, e sua massa foi determinada em balança semi-analítica, com precisão de 0,1 g.

O recipiente onde os ensaios ocorreram foram preenchidos com água destilada à temperatura de 20 °C, de modo que quando o corpo-de-prova ficou submerso, o nível de água ficou cerca de 25 mm acima da superfície superior do corpo-de-prova, como indicado na norma.

Após  $2h \pm 3min$  e  $24h \pm 3 min$  de imersão retirou-se o corpo-de-prova do recipiente e foi removido o excesso de água com papel absorvente. Em seguida, mediu-se novamente a espessura do corpo-de-prova em seu centro, com uma resolução de 0,01 mm, e obteve-se o novo peso em balança semi-analítica com precisão de 0,1g, anotando os respectivos dados, bem como o tempo ou tempos de imersão utilizados.

#### 4.2.4.3.3. Cálculos e expressão dos resultados

Para o cálculo de inchamento da espessura do corpo-de-prova, utilizou-se a Equação 5.

$$I = \frac{E1 - E0}{E0.100} \quad (5)$$

Onde:

$I$  é o inchamento em espessura do corpo-de-prova (%);

$E1$  é a espessura do corpo-de-prova após o período de imersão considerado (mm);

$E0$  é a espessura do corpo-de-prova antes da imersão (mm).

Para o cálculo de absorção de água, utilizar a seguinte Equação 6.

$$A = \frac{M1 - M0}{M0.100} \quad (6)$$

Onde:

$A$  é a absorção de água (%);

$M1$  é a massa do corpo-de-prova após imersão (g);

$M0$  é a massa do corpo-de-prova antes da imersão (g).

#### 4.2.4.4. Determinação da resistência à flexão e módulo de elasticidade

A seguir estão descritas as características dos corpos de prova, a metodologia do ensaio e os cálculos para a determinação do módulo de elasticidade e módulo de ruptura.

#### 4.2.4.4.1. Corpos-de-prova

Foram utilizados 10 corpos-de-prova de 250 x 50 mm nos ensaios de determinação da resistência à flexão e módulo de elasticidade.

#### 4.2.4.4.2. Procedimento

Os extremos do corpo-de-prova foram colocados sobre os dois apoios da máquina universal de ensaios (Figura 31), sendo que o comprimento foi de 10 vezes a dimensão da espessura, com comprimento mínimo de 200 mm, de modo que o dispositivo para aplicar a carga coincidisse com o centro do corpo-de-prova. Previamente à colocação dos corpos-de-prova, mediram-se as dimensões de suas seções transversais, com resolução de 0,1 mm.

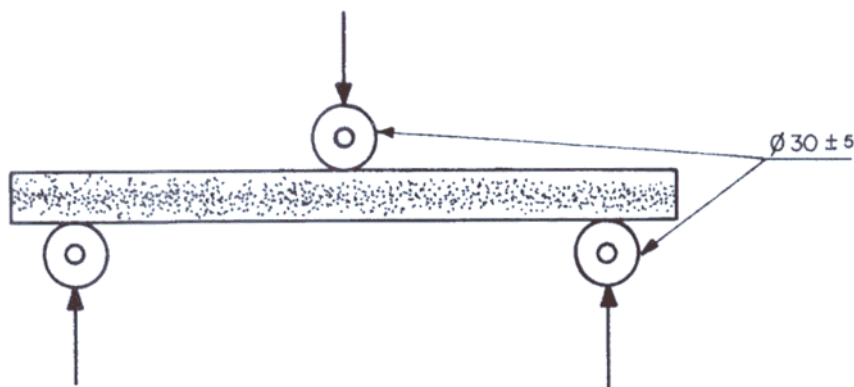


Figura 31: Forma de colocação do corpo-de-prova sobre os apoios da máquina universal de ensaios.

Fonte: NBR 14810-3 (2006).

O indicador de carga da máquina universal de ensaios foi zerado e foi acionado com velocidade constante de 6 mm/min.

#### 4.2.4.4.3. Cálculos dos resultados

- **Módulo de ruptura**

Calculou-se a resistência à flexão do corpo-de-prova através da seguinte Equação 7.

$$MOR = \frac{1,5 \cdot (P \cdot D)}{B \cdot (E)^2} \quad (7)$$

Onde:

*MOR* é o módulo de ruptura (MPa);

*P* é a carga de ruptura lida no indicador de cargas (N);

*D* é a distância entre apoios do aparelho (mm);

*B* é a largura do corpo-de-prova (mm);

*E* é a espessura média tomada em três pontos do corpo-de-prova (mm).

- **Módulo de elasticidade**

Para calcular o módulo de elasticidade do corpo-de-prova foi utilizada a Equação 8.

$$MOE = \frac{P1 \cdot D^3}{d \cdot 4 \cdot B \cdot E^3} \quad (8)$$

Onde:

*MOE* é o módulo de elasticidade (MPa);

*P1* é a carga no limite proporcional lida no indicador de cargas (N);

*D* é a distância entre os apoios do aparelho (mm);

*d* é a deflexão (mm), correspondente à carga *P1*;

*B* é a largura do corpo-de-prova (mm);

$E$  é a espessura média tomada em três pontos do corpo-de-prova (mm).

#### **4.2.4.5. Determinação da resistência à tração perpendicular**

A seguir estão descritas as características dos corpos de prova, a metodologia do ensaio e os cálculos para a determinação da resistência à tração perpendicular.

##### **4.2.4.5.1. Corpos de prova**

Para realização do ensaio de resistência à tração, os corpos-de-prova devem apresentar 50 x 50 mm. Foram necessários 10 corpos-de-prova.

##### **4.2.4.5.2. Reagentes ou materiais**

Os reagentes e materiais necessários à execução do ensaio são os descritos a seguir:

- a) adesivo termofusível (cola *hot-melt*), uréia-formol, PVAc ou outro adesivo indicado para colagem dos blocos de tração aos corpos-de-prova;
- b) lixa de grana 80.

##### **4.2.4.5.3. Aparelhagem**

A aparelhagem utilizada na execução do ensaio é a descrita a seguir:

- a) máquina universal de ensaios com controle de velocidade;
- b) dois blocos de tração de material com resistência compatível com a chapa de madeira aglomerada (blocos metálicos, madeira, etc), conforme exemplificado na Figura 32;

- c) dispositivos para prender os blocos de tração, conforme mostrado na Figura 33;  
 d) paquímetro.

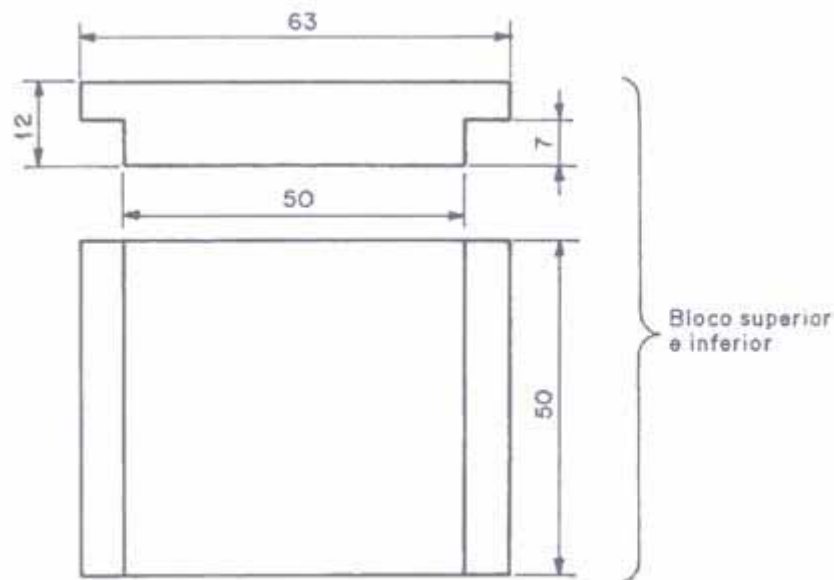


Figura 32: Dimensões dos blocos de tração.

Fonte: NBR 14810-3 (2006).

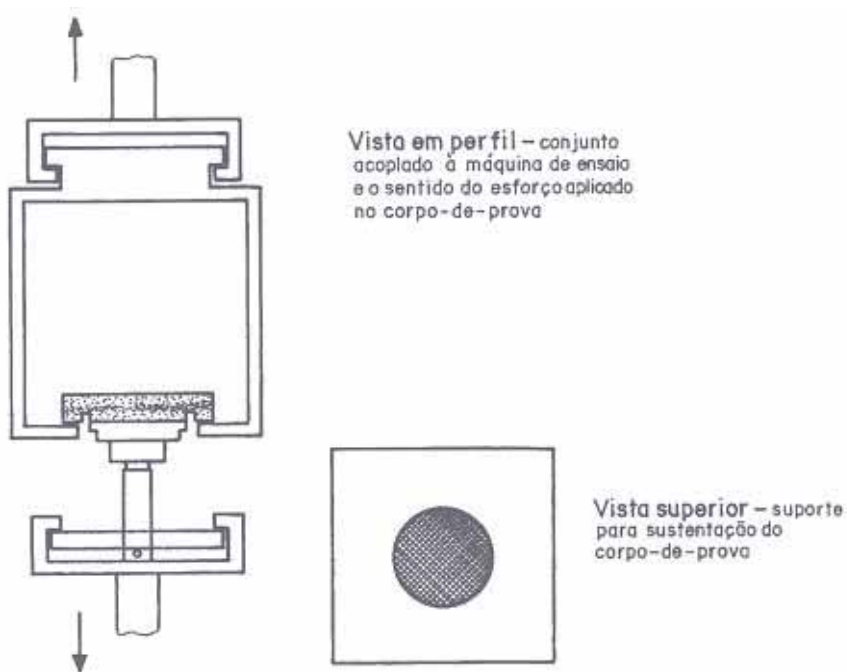


Figura 33: Acessório para acoplar dispositivo metálico circular.

Fonte: NBR 14810-3 (2006).

#### 4.2.4.5.4. Procedimento

Foi medido com paquímetro a largura e o comprimento do corpo-de-prova com resolução de 0,1 mm. Os corpos-de-prova foram colados nos blocos de tração pelas superfícies, aplicando pressão moderada. Após a colagem, o conjunto formado pelo bloco de tração, corpo-de-prova e bloco de tração (Figura 34) foram acondicionados.

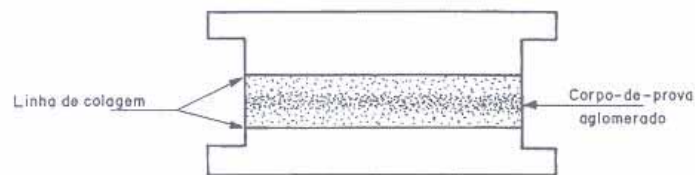


Figura 34: Corpo-de-prova entre blocos de tração formando um conjunto.

Fonte: NBR 14810-3.

Em seguida à climatização, acoplou-se o conjunto formado conforme explicado acima, no dispositivo para prender os blocos de tração na máquina universal de ensaios, de acordo com a Figura 35, e regulou-se a máquina universal de ensaios para uma velocidade de 4 mm/min. Em seguida, foi acionada a máquina de ensaios até a ruptura do corpo-de-prova.

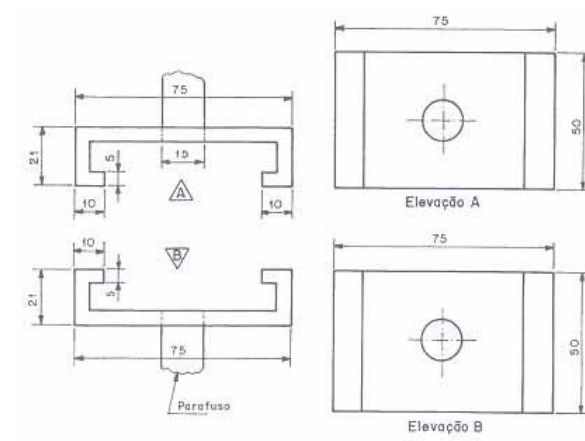


Figura 35: Dimensões dos dispositivos para prender os blocos de tração.

Fonte: NBR 14810-3.

#### 4.2.4.5.5. Cálculos e expressão dos resultados

Foi calculado a resistência à tração perpendicular do corpo-de-prova, através da Equação 9.

$$TP = \frac{P}{S} \quad (9)$$

Onde:

$TP$  é a resistência à tração perpendicular (MPa);

$P$  é a carga na ruptura (N);

$S$  é a área da superfície do corpo-de-prova (mm<sup>2</sup>).

## **5. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Os resultados dos ensaios físicos e mecânicos para a caracterização da chapa de partículas estão apresentados nas Tabelas 6 a 13 e serão comparados com a norma brasileira para aglomerado ABNT 14810-2/2006 e documento europeu para MDF EMB - Euro MDF Board/1993. Os resultados também foram comparados a resultados encontrados na literatura.

### **5.1. Densidade**

Os resultados de densidade estão mostrados na Tabela 6, onde estão apresentados os valores dos dez corpos-de-prova nas situações com 5, 10, 15 e 20% de casca na camada intermediária, juntamente com a média e o desvio padrão desses valores. Os valores foram superiores a  $750 \text{ kg/m}^3$ , o que indica que as chapas são de alta densidade de acordo com a NBR ABNT 14810-2.

Resultados encontrados na literatura Batista et al. (2008) em estudo semelhante a este, com um painel produzido com 10% de casca na camada interna e parafina, obtiveram uma densidade de  $701 \text{ kg/m}^3$ , caracterizando-os como painéis de média densidade.

Tabela 6: Corpos-de-prova para ensaio de densidade.

| CP        | 5%      | 10%     | 15%     | 20%     |
|-----------|---------|---------|---------|---------|
| A         | 944,57  | 950,89  | 971,91  | 964,73  |
| B         | 833,87  | 1019,08 | 1063,7  | 1002,05 |
| C         | 863,62  | 1077,26 | 1087,63 | 992,36  |
| D         | 819,49  | 1112,53 | 1099,08 | 970,93  |
| E         | 1060,73 | 772,12  | 1096,12 | 977,73  |
| F         | 1060,71 | 974,24  | 1067,13 | 1042,28 |
| G         | 849,99  | 953,63  | 1104,33 | 1104,42 |
| H         | 1029,4  | 1117,86 | 1071,28 | 1029,85 |
| I         | 1004,05 | 967,62  | 914,28  | 1081,95 |
| J         | 888,66  | 1092,9  | 961,47  | 1071,83 |
| Média     | 935,51  | 1003,81 | 1043,69 | 1023,81 |
| Desv.Pad. | 96,28   | 105,19  | 68,15   | 49,93   |

## 5.2. Teor de umidade

Os resultados dos dez ensaios para teor de umidade estão apresentados na Tabela 7, assim como valores das médias e desvio padrão de todas as situações ensaiadas neste trabalho. Comparando os valores obtidos com a norma ABNT NBR 14810-2 que especifica que as chapas devem ter umidade mínima de 5% e máxima de 11%, a única situação que atendeu a norma foi à chapa que continha 5% de casca. A chapa com 10% de casca ultrapassou um pouco o valor máximo aceitável com base na norma, entretanto, as outras duas chapas apresentaram valores bem superiores aos esperados, não atendendo as exigências normativas.

Tabela 7: Corpos-de-prova para ensaio de Teor de Umidade.

| CP        | 5%    | 10%   | 15%   | 20%   |
|-----------|-------|-------|-------|-------|
| A         | 11,92 | 11,5  | 14,89 | 15,32 |
| B         | 10,09 | 10,58 | 13,91 | 13,53 |
| C         | 10,61 | 12,35 | 12,73 | 14,15 |
| D         | 11,73 | 10,85 | 13,5  | 15,47 |
| E         | 10,43 | 12,95 | 12,42 | 16,82 |
| F         | 11,31 | 11,55 | 13,04 | 16,32 |
| G         | 11,95 | 11,34 | 14,15 | 15,74 |
| H         | 9,51  | 10,93 | 12,7  | 15,67 |
| I         | 9,27  | 11,65 | 12,54 | 16,28 |
| J         | 10,94 | 10,84 | 14,41 | 15,95 |
| Média     | 10,78 | 11,46 | 13,43 | 15,52 |
| Desv.Pad. | 0,96  | 0,74  | 0,87  | 1     |

A casca por apresentar maior teor de umidade inicial e por suas características morfológicas impediu a saída de água existente no interior do painel para o tempo de prensagem de 10 minutos. Observa-se ainda que o aumento da porcentagem de casca elevou o teor de umidade do painel, comprovando o que era esperado.

### 5.3. Inchamento em espessura por 2 horas

Os resultados obtidos no ensaio de inchamento em espessura após imersão por 2 horas (Tabela 8), foram comparados aos valores propostos pela norma brasileira NBR 14810-2. Todos os valores apresentaram inchamento menor que 8%, atendendo a norma.

O valor médio apresentado pela literatura Batista et al. (2008) nesse ensaio foi de 75,2%. Se comparado com o presente trabalho que apresenta inchamento em espessura de 4,42%, nota-se uma grande discrepância de valores. Tal discrepância pode ser justificada pelo fato desta chapa ter sido muito mais adensada e ter sido utilizado uma maior quantidade de adesivo na produção da mesma.

Tabela 8: Corpos-de-prova (CP) para ensaio de Inchamento em espessura por 2 h.

| CP        | 5%   | 10%  | 15%  | 20%  |
|-----------|------|------|------|------|
| A         | 3,9  | 3,66 | 6,12 | 4,22 |
| B         | 4,54 | 5,73 | 5,82 | 6,15 |
| C         | 4,91 | 2,83 | 5,34 | 5,99 |
| D         | 4,35 | 5,2  | 5,77 | 6,61 |
| E         | 5,56 | 4,4  | 5    | 7,74 |
| F         | 4,93 | 4,07 | 2,84 | 3,25 |
| G         | 3,88 | 4,59 | 4,36 | 4,39 |
| H         | 3,35 | 3,66 | 3,26 | 3,35 |
| I         | 6,05 | 4,74 | 5,86 | 3    |
| J         | 5,68 | 5,38 | 4,82 | 3,65 |
| Média     | 4,72 | 4,42 | 4,92 | 4,83 |
| Desv.Pad. | 0,87 | 0,89 | 1,13 | 1,66 |

#### 5.4. Inchamento em espessura por 24 horas

Para o ensaio de inchamento por 24 horas, a norma brasileira não apresenta valores mínimos e máximos admissíveis, por isso tal comparação foi realizada com base na norma EMB Euro MDF Board – Painéis para usos internos. O valor máximo para inchamento por 24 horas é de 12%, portanto, só as chapas compostas com 5 e 10% de casca estão em conformidade com essa norma, como mostra a Tabela 9.

Para o ensaio de inchamento por 24 horas, o resultado obtido na literatura Batista et al. (2008) foi de 164,2%, valor muito superior ao esperado pela norma e ao encontrado no presente trabalho. Tal resultado pode ser explicado pelos mesmos motivos apresentados anteriormente para o inchamento 2 horas.

Tabela 9: Corpos-de-prova para ensaio de Inchamento em espessura por 24 h.

| CP        | 5%    | 10%   | 15%   | 20%   |
|-----------|-------|-------|-------|-------|
| A         | 8,87  | 10,86 | 13,14 | 13,8  |
| B         | 10,85 | 11,77 | 14,04 | 13,41 |
| C         | 14,12 | 6,46  | 11,18 | 15,03 |
| D         | 10,73 | 10,4  | 12,64 | 14,85 |
| E         | 12,34 | 9,96  | 10,59 | 14,3  |
| F         | 11,18 | 10,29 | 10    | 12,58 |
| G         | 10,29 | 11,25 | 13,74 | 14,24 |
| H         | 10,57 | 13,36 | 8,65  | 10,73 |
| I         | 16    | 12,33 | 14,54 | 11,32 |
| J         | 14,24 | 14,56 | 13,32 | 11,42 |
| Média     | 11,92 | 11,12 | 12,18 | 13,17 |
| Desv.Pad. | 2,21  | 2,19  | 1,96  | 1,56  |

### 5.5. Absorção de água por 2 horas

Não foram encontrados valores mínimos e máximos para este ensaio nas normas ABNT NBR 14810-2 e EMB Euro MDF Board. Portanto, a única comparação feita será com a literatura Batista et al. (2008).

O valor encontrado na literatura foi de 163,9%, muito maior que o obtido nesse trabalho, como mostra a Tabela 10.

Tabela 10: Corpos-de-prova para ensaio de Absorção 2 horas.

| CP        | 5%   | 10%  | 15%  | 20%  |
|-----------|------|------|------|------|
| A         | 0,78 | 1,30 | 1,26 | 1,45 |
| B         | 1,21 | 1,10 | 1,45 | 1,65 |
| C         | 1,25 | 0,40 | 1,10 | 1,11 |
| D         | 0,95 | 0,44 | 0,70 | 0,90 |
| E         | 0,56 | 0,42 | 0,40 | 1,25 |
| F         | 0,41 | 0,16 | 0,31 | 1,41 |
| G         | 0,13 | 0,99 | 1,19 | 1,59 |
| H         | 0,44 | 0,35 | 0,16 | 0,30 |
| I         | 1,28 | 0,90 | 0,16 | 0,36 |
| J         | 1,10 | 1,21 | 0,96 | 0,30 |
| Média     | 0,81 | 0,73 | 0,77 | 1,03 |
| Desv.Pad. | 0,41 | 0,41 | 0,49 | 0,54 |

### 5.6. Absorção de água por 24 horas

Os resultados obtidos nos ensaios para a determinação da absorção de água foram comparados com os valores especificados pela norma EMB que determina valores máximos para o ensaio de absorção por 24 horas. O valor máximo permitido é de 35%, portanto todas as chapas estão de acordo com essa norma como mostra a Tabela 11.

Em comparação com a literatura Batista et al. (2008), o ensaio de absorção em água por 24 horas obteve resultado de 173,7% na literatura, que por sua vez é muito superior ao máximo permitido pelas normas e também é superior ao valor encontrado no presente trabalho.

Tabela 11: Corpos-de-prova para ensaio de Absorção de água por 24 h.

| CP        | 5%    | 10%   | 15%   | 20%   |
|-----------|-------|-------|-------|-------|
| A         | 8,5   | 11,83 | 10,96 | 14,1  |
| B         | 9,8   | 12,09 | 12,5  | 15,2  |
| C         | 10,4  | 7,1   | 10,71 | 15,87 |
| D         | 9,54  | 9,93  | 10,96 | 15,08 |
| E         | 10,58 | 7,8   | 8,47  | 14,16 |
| F         | 8,97  | 9,15  | 21,91 | 15,64 |
| G         | 8,92  | 10,41 | 13,95 | 15,37 |
| H         | 11,05 | 12,48 | 9,56  | 7,84  |
| I         | 14,77 | 16,09 | 10,66 | 29,04 |
| J         | 13,01 | 13,86 | 10,91 | 8,33  |
| Média     | 10,55 | 11,07 | 12,05 | 15,06 |
| Desv.Pad. | 1,97  | 2,76  | 3,77  | 5,73  |

Destaca-se que tanto o inchamento quanto a absorção de água foram bastante reduzidos nesse trabalho, pois os painéis apresentaram alta densidade, ou seja, menor quantidade de vazios, o teor de adesivo utilizado foi bem superior ao utilizado no estudo comparado, além do tempo de prensagem ter sido maior no presente trabalho.

### 5.7. Ensaio de flexão estática – MOE e MOR

O valor de MOR (módulo de ruptura) admitido pela NBR 14810-2 para a espessura de 10 mm é de 18 MPa. Como mostra a Tabela 12, os resultados obtidos foram sempre superiores. Na norma EMB, o valor mínimo para MOR é de 22 MPa, todas as chapas também atenderam a essa especificação.

Destaca-se que a norma brasileira não apresenta valor mínimo para o módulo de elasticidade, portanto, adotou-se como meios de comparação trabalhos encontrados na literatura e a norma européia para MDF.

Para comparação com os valores de MOE (módulo de elasticidade) do painel, foi utilizada somente a norma EMB que especifica um valor mínimo de 2500 MPa. Todas as chapas atenderam a norma.

Os valores encontrados na literatura Batista et al. (2008) para MOR e MOE foram de 6,52 MPa e 956,91 MPa, respectivamente. Os valores obtidos nesse trabalho foram superiores novamente.

Tabela 12: Corpos-de-prova para ensaio de Flexão estática, apresentando os valores de MOR e MOE em MPa.

|           | 5%    |          | 10%   |          | 15%   |         | 20%   |         |
|-----------|-------|----------|-------|----------|-------|---------|-------|---------|
| CP        | MOR   | MOE      | MOR   | MOE      | MOR   | MOE     | MOR   | MOE     |
| A         | 27,74 | 11811,74 | 28,6  | 9704,76  | 25,68 | 4445,49 | 30,69 | 4257,91 |
| B         | 33,12 | 8482,43  | 30,42 | 11469,04 | 17,26 | 9381,18 | 28,19 | 4483,2  |
| C         | 29,04 | 9036,06  | 32,23 | 12377,9  | 23,84 | 7394,79 | 19,9  | 5550,66 |
| D         | 30,39 | 8359,79  | 21,58 | 13514,85 | 25,15 | 6078,62 | 19,49 | 6507,45 |
| E         | 32,5  | 7918,19  | 21,26 | 13367,34 | 21,42 | 5252,53 | 21,73 | 5377,42 |
| F         | 29,59 | 9425,36  | 28,18 | 7817,36  | 26,23 | 5618,35 | 30,22 | 6322,82 |
| G         | 25,06 | 13943,75 | 18,95 | 10985,21 | 29,22 | 4105,3  | 30,64 | 4464,69 |
| H         | -     | -        | 20,78 | 6979,17  | 27,26 | 11269,1 | 25,79 | 5326,85 |
| I         | -     | -        | 21,41 | 5938,98  | 30,81 | 3610,6  | 18,99 | 8977,56 |
| J         | -     | -        | 30,08 | 5633,29  | 32,27 | 4124,17 | 32,89 | 4997,92 |
| Média     | 29,63 | 9853,9   | 25,35 | 9778,79  | 25,91 | 6128,01 | 25,85 | 5626,65 |
| Desv.Pad. | 2,76  | 2208,8   | 4,97  | 3009,68  | 4,44  | 2514,89 | 5,38  | 1397,35 |

## 5.8. Tração perpendicular

Por fim, os valores do ensaio de tração perpendicular (adesão interna) estão mostrados na Tabela 13. De acordo com a norma brasileira NBR 14810-2, o valor mínimo pra esse ensaio é de 0,4 MPa. Já a norma européia EMB especifica mínimo de 0,6 MPa. Todas as chapas obtiveram valores superiores aos exigidos por norma.

O valor encontrado na literatura foi de 0,101 MPa. Portanto, os resultados obtidos nesse trabalho foram muito superiores.

Tabela 13: Valores de tensão do ensaio de Tração perpendicular, expressos em MPa.

| CP        | 5%   | 10%  | 15%  | 20%  |
|-----------|------|------|------|------|
| A         | 1,87 | 1,80 | 1,85 | 2,05 |
| B         | 1,62 | 1,93 | 2,02 | 1,88 |
| C         | 1,48 | 1,66 | 2,08 | 1,78 |
| D         | 2,23 | 1,66 | 1,76 | 2,02 |
| E         | 2,08 | 1,31 | 1,94 | 1,86 |
| F         | 2,13 | 1,93 | 2,02 | 1,50 |
| G         | 1,75 | 1,83 | 1,80 | 1,59 |
| H         | 2,01 | 2,01 | 1,98 | 2,04 |
| I         | 1,80 | 1,59 | 1,71 | 1,96 |
| J         | 2,08 | 2,01 | 1,72 | 1,63 |
| Média     | 1,91 | 1,77 | 1,89 | 1,83 |
| Desv.Pad. | 0,24 | 0,22 | 0,14 | 0,20 |

Destaca-se que os valores obtidos no presente trabalho foram bastante superiores aos encontrados na literatura e aos valores especificados em norma. Justificam-se tais valores, pois os painéis desenvolvidos neste estudo apresentaram alta densidade, sendo assim maior superfície de contato entre as partículas, maior interação entre as mesmas, ou seja, menor quantidade de vazios, além do fato de o teor de adesivo utilizado ter sido bem superior ao utilizado no estudo comparado ou mesmo utilizados comercialmente.

## 6. CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos no presente estudo, pode concluir que:

- De acordo com a densidade obtida no ensaio físico é possível classificar esse painel de partículas como sendo de alta densidade, fator justificado pela dosagem de adesivo utilizada, densidade elevada das partículas utilizadas e também alta densificação do painel na prensa, obtida pelo maior tempo de prensagem. Os valores obtidos em todos os quatro tratamentos foram superiores aos esperados pelas normas comparativas, pelo fato do painel ter sido muito densificado durante a prensagem;
- Antes de considerar os valores obtidos para as propriedades como referência para comercialização de chapas de partículas de madeira com casca na camada intermediária, novos ensaios devem ser realizados, procurando minimizar os possíveis erros ocorridos neste trabalho;
- O aproveitamento de resíduos é viável na atualidade, uma vez que é possível conseguir um uso mais racional para a matéria-prima, agregando valor ao material. Não esquecendo do grande impacto ambiental causado pelos mesmos quando descartados indevidamente;
- Todos os ensaios realizados na chapa com 5% de casca na camada intermediária obtiveram resultados favoráveis quando comparados com a norma NBR 14810-2.

E alguns fatores podem ser ajustados procurando melhorar o processo do painel, isso tornará o painel produzido no laboratório mais próximo do produzido na indústria, como por exemplo:

- Diminuir o tempo de prensagem;
- Diminuir a quantidade de adesivo;

## 7. BIBLIOGRAFIA

ABIMCI - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA. **Estudo setorial**. Curitiba, 1999. 54p.

ABRAF – Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. **Anuário Estatístico da ABRAF**. Brasília, 2011. 130p.

AMERICAN FOREST & PAPER ASSOCIATION. **Engineered wood products primer awareness guide**. Washington: American Wood Council, 2006. Disponível em: <<http://www.woodaware.info/PDFs/EWPPPrimer.pdf>>. Acesso em: 30 maio 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE PAINÉIS DE MADEIRA (ABIPA). **Produtos e tecnologia: nossos produtos**. São Paulo. 2009. Disponível em: <<http://abipa.org.br/produtosMDP.php>>. Acesso em: 30 maio 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14810**: Chapa de madeira aglomerada. Parte 1: Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14810**: Chapa de madeira aglomerada. Parte 2: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14810**: Chapa de madeira aglomerada. Parte 1: Métodos de Ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

BARROS FILHO, R. M. **Painéis aglomerados a base de bagaço de cana-de-açúcar e resinas uréia formaldeído e melamina formaldeído**. 2009. 116 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais, Área de concentração análise e seleção de materiais) Universidade Federal Ouro Preto, Minas Gerais, 2009.

BATISTA, D. C.; BRITO, E. O.; SETUBAL, V. G.; GÓES, L. G. Fabricação de aglomerados de três camadas com madeira de *Pinus elliottii engelm.* e casca de *Eucalyptus pellita* f. Muell. **Cerne**, Lavras, v. 13, n. 002, p. 178-187, 2007.

BIAZUS, A.; HORA, A. B.; LEITE, B. G. P. **Panorama de mercado: painéis de madeira.** 2010

BRITO, E. O. **Produção de chapas de partículas de madeira a partir de maravalhas de *Pinus elliottii* Engelm plantado no Sul do Brasil.** 1995. 127 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1995.

CETESB. **Resíduos sólidos industriais.** São Paulo: CETESB/ASCETESB, 1985. 182p.

COSTA, V. E.; **Caracterização físico-energética da madeira e produtividade de reflorestamentos de clones de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*.** 2006. 99 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP – Campus de Botucatu, Botucatu, 2006.

DIAS, F. M. **Aplicação de resina poliuretana à base de mamona na fabricação de painéis de madeira compensada e aglomerada.** 2005. 116 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Escola de Engenharia de São Carlos/ Instituto de Física de São Carlos/ Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

EMB - Euro MDF Board (1995), /Definitions, Test Methods and Requeriments Industry Standard, Part II: Requeriments for General Purpose Boards BEM/IS/. Giessen, Alemanha. Dezembro 1995.

FOELKEL, C. **Casca da árvore do eucalipto: Aspectos morfológicos, fisiológicos, florestais, ecológicos e industriais, visando a produção de celulose e papel.** [2006?]. Disponível em: < <http://www.eucalyptus.com.br/> >. Acesso em: 28 de maio de 2011.

GONÇALEZ, J. C. et al. Características tecnológicas da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill Ex Maiden e *Eucalyptus cloeziana* F. Muell visando ao seu aproveitamento na indústria moveleira. **CIÊNCIA FLORESTAL**, Santa Maria, v. 16, n. 003, p. 329-341, 2006. Disponível em: <<http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=53416308>>. Acesso em: 27 de abril 2011.

HASELEIN, C. R. et al. Fabricação de chapas de partículas aglomeradas usando gesso como material cimentante. **Revista Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 12, n. 001, p.81-88, 2002.

IWAKIRI, S. et al. Utilização de resíduos de serraria na produção de chapas de madeira aglomerada de *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus citriodora* e *Eucalyptus pilularis*. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 7, n. 1, p. 251-256, 2000.

IWAKIRI, S.; KEINERTJR, S; ALBUQUERQUE, C.E.C; LATORRACA, J.V. DE F; MENDES,L.M..**Painéis de madeira reconstituída**. 1ª ed. Curitiba-PR: Ajir Gráfica e Editora Ltda. 2005.

KOLLMANN, F. F. P.; KUENZI, E. W.; STAMM, A. J.; **Principles of wood science and technology**. II, Wood based materials. Berlin: Springer-Verlag, 1975. p.61-171.

MACIEL, A. C. et. al. Chapas de madeira aglomerada produzidas com partículas de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, poliestireno (PS) e polietileno tereftalato (PET). **Cerne**, Lavras, v. 10, n. 1, p.53-66, 2004.

MADEIRA TOTAL. **Estrutura físico-química da madeira**. Disponível em: <<http://www.madeiratotal.com.br/ntc.asp?Cod=2980>>. Acesso em: 10 de janeiro de 2008.

MALONEY, T. M. **Modern Particleboard and dry-process fiberboard manufacturing**. San Francisco: Miller Freeman Inc, 1993. 689p.

MATTOS, P. P.; SILVA, V. P.; MAGALHÃES, W. L. E. Agregação de valor à pequena produção florestal madeireira. **Embrapa**. Colombo, 2004. Disponível em:

<<http://www.cnpf.embrapa.br/publica/seriedoc/edicoes/doc103.pdf>>. Acesso em: 22 de maio de 2011.

MATTOS, R. L. G.; GONÇALVES, R. M.; CHAGAS, F. B. Painéis de madeira no Brasil: panorama e perspectivas. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 27, p.121-156, 2008. Disponível em:  
<[http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes\\_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/set2706.pdf](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/set2706.pdf)>. Acesso em: 22 de maio de 2011.

MENDES, L.M.; ABUQUERQUE, C.E.C.; IWAKIRI, S. Perspectivas do processo de produção de painéis OSB. **Anais do VII Encontro Brasileiro em Madeiras e Estruturas de Madeira**. CD-ROM. São Carlos/SP 2000.

NOLASCO, A. M. **Resíduos da colheita e beneficiamento da caixeta – *Tabebuia cassinoides* (Lam.) DC.: caracterização e perspectivas**. 2000. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Carlos, São Carlos.

Painéis. **De olho no crescimento**. 2007. Disponível em:  
<<http://www.revistareferencia.com.br/>>. Acesso em: 11 de maio de 2011.

SANTIAGO, F. L. S. **Estudo da viabilidade técnica e econômica para aproveitamento de cascas de *eucalyptus* gerados no processo de fabricação de painéis de madeira**. 2007. 89 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP – Campus de Botucatu, Botucatu, 2007.

VITAL, M. H. F. Impacto ambiental de florestas de eucalipto. **Revista BNDES**, Rio de Janeiro. V. 14, n. 28, p. 235-276, 2007. Disponível em:  
<[http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes\\_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/revista/rev2808.pdf](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/revista/rev2808.pdf)>. Acesso em: 15 de maio de 2011.

YOUNGQUIST, J. A. Wood-based composites and panel products. **Wood handbook:** wood as an engineering material. Washington: Forest Products Society, 1999. 428p.

**APÊNDICE A - RESULTADOS E GRÁFICOS OBTIDOS NOS ENSAIOS  
MECÂNICOS DE FLEXÃO ESTÁTICA E TRAÇÃO PERPENDICULAR**

| Corpo de Prova | Área               | Tensão na Ruptura | Deformação a F10% na fase final do ensaio (mm) | Deformação a F40% na fase final do ensaio (mm) | Modulo de Elasticidade na fase final do ensaio (MPa) | Limite de Proporc. na fase final do ensaio (kgf) | Força Máxima |
|----------------|--------------------|-------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------|
|                | (mm <sup>2</sup> ) | (MPa)             |                                                |                                                |                                                      |                                                  | (N)          |
| CP 1           | 14,25              | 27,74             | 0,56                                           | 2,50                                           | 11811,74                                             | 9,59                                             | 395,30       |
| CP 2           | 14,75              | 33,12             | 0,53                                           | 1,99                                           | 8482,43                                              | 11,62                                            | 488,51       |
| CP 3           | 15,20              | 29,04             | 0,50                                           | 2,14                                           | 9036,06                                              | 10,79                                            | 441,56       |
| CP 4           | 15,29              | 30,39             | 0,35                                           | 1,88                                           | 8359,79                                              | 12,48                                            | 464,70       |
| CP 5           | 15,37              | 32,50             | 0,32                                           | 1,78                                           | 7918,19                                              | 13,22                                            | 499,39       |
| CP 6           | 14,79              | 29,59             | 0,39                                           | 2,03                                           | 9425,36                                              | 11,83                                            | 437,48       |
| CP 7           | 13,82              | 25,06             | 0,53                                           | 2,73                                           | 13943,75                                             | 9,52                                             | 346,31       |
| Número CPs     | 7                  | 7                 | 7                                              | 7                                              | 7                                                    | 7                                                | 7            |
| Média          | 14,78              | 29,64             | 0,4534                                         | 2,149                                          | 9854                                                 | 11,29                                            | 439,0        |
| Desv. Padrão   | 0,5755             | 2,763             | 0,1011                                         | 0,3442                                         | 2209                                                 | 1,403                                            | 53,65        |
| Coef.Var.(%)   | 3,894              | 9,325             | 22,29                                          | 16,02                                          | 22,42                                                | 12,42                                            | 12,22        |
| Mínimo         | 13,82              | 25,06             | 0,3154                                         | 1,775                                          | 7918                                                 | 9,520                                            | 346,3        |
| Máximo         | 15,37              | 33,12             | 0,5644                                         | 2,727                                          | 13940                                                | 13,22                                            | 499,4        |

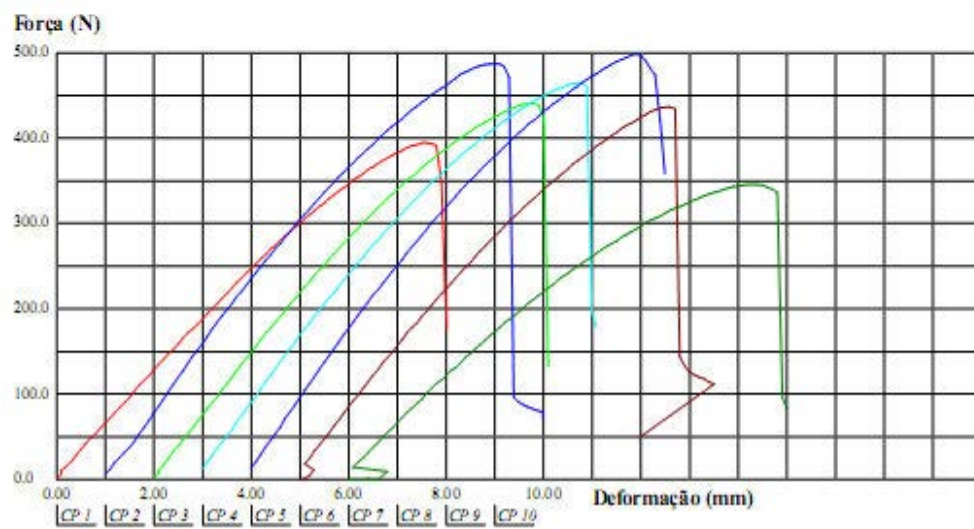


Figura 36: Ensaio de flexão estática com a chapa de situação 1 (5% de casca na camada interna).

Fonte: Laboratório de Propriedades dos Materiais – UNESP – Campus Itapeva.

| Corpo de Prova | Área               | Tensão na Ruptura | Deformação a F10% na fase final do ensaio (mm) | Deformação a F40% na fase final do ensaio (mm) | Modulo de Elasticidade na fase final do ensaio (MPa) | Limite de Proporc. na fase final do ensaio (kgf) | Força Máxima (N) |
|----------------|--------------------|-------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------|
|                | (mm <sup>2</sup> ) | (MPa)             |                                                |                                                |                                                      | (kgf)                                            |                  |
| CP 1           | 14.89              | 28.60             | 0.77                                           | 2.48                                           | 9704.76                                              | 8.47                                             | 425.91           |
| CP 2           | 13.20              | 30.42             | 0.46                                           | 2.14                                           | 11469.04                                             | 11.85                                            | 401.42           |
| CP 3           | 12.94              | 32.23             | 0.52                                           | 2.28                                           | 12377.90                                             | 11.07                                            | 417.07           |
| CP 4           | 13.62              | 21.58             | 0.68                                           | 2.76                                           | 13514.85                                             | 8.86                                             | 293.92           |
| CP 5           | 14.24              | 21.26             | 0.57                                           | 2.77                                           | 13367.34                                             | 9.14                                             | 302.77           |
| CP 6           | 15.35              | 28.18             | 0.38                                           | 1.81                                           | 7817.36                                              | 12.85                                            | 432.72           |
| CP 7           | 15.83              | 18.95             | 0.31                                           | 2.43                                           | 10985.21                                             | 10.35                                            | 300.05           |
| CP 8           | 16.43              | 20.78             | 0.31                                           | 1.73                                           | 6979.17                                              | 13.09                                            | 341.55           |
| CP 9           | 17.26              | 21.41             | 0.28                                           | 1.59                                           | 5938.98                                              | 13.77                                            | 369.44           |
| CP 10          | 16.74              | 30.08             | 0.09                                           | 1.27                                           | 5633.29                                              | 16.90                                            | 503.48           |
| Número CPs     | 10                 | 10                | 10                                             | 10                                             | 10                                                   | 10                                               | 10               |
| Média          | 15.05              | 25.35             | 0.4377                                         | 2.127                                          | 9779                                                 | 11.64                                            | 378.8            |
| Desv. Padrão   | 1.526              | 4.969             | 0.2049                                         | 0.5109                                         | 3010                                                 | 2.622                                            | 69.37            |
| Coef.Var.(%)   | 10.14              | 19.60             | 46.81                                          | 24.02                                          | 30.78                                                | 22.54                                            | 18.31            |
| Mínimo         | 12.94              | 18.95             | 0.09185                                        | 1.273                                          | 5633                                                 | 8.467                                            | 293.9            |
| Máximo         | 17.26              | 32.23             | 0.7723                                         | 2.774                                          | 13510                                                | 16.90                                            | 503.5            |

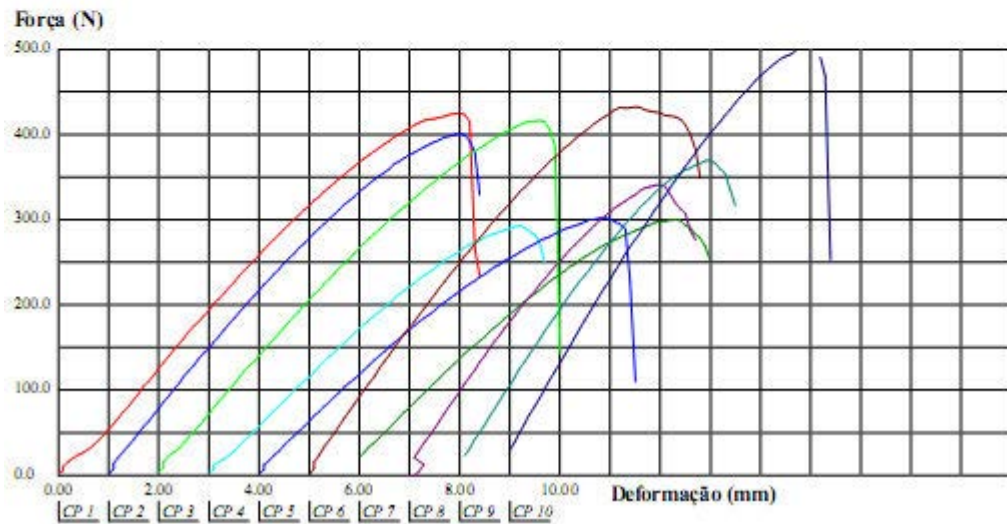


Figura 37: Ensaio de flexão estática com a chapa de situação 2 (10% de casca na camada interna).

Fonte: Laboratório de Propriedades dos Materiais – UNESP – Campus Itapeva.

| Corpo de Prova | Área               | Tensão na Ruptura | Deformação a F10% na fase final do ensaio (mm) | Deformação a F40% na fase final do ensaio (mm) | Modulo de Elasticidade na fase final do ensaio (MPa) | Limite de Proporc. na fase final do ensaio (kgf) | Força Máxima |
|----------------|--------------------|-------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------|
|                | (mm <sup>2</sup> ) | (MPa)             |                                                |                                                |                                                      | (kgf)                                            | (N)          |
| CP 1           | 15,95              | 25,68             | 0,29                                           | 1,45                                           | 4445,49                                              | 11,58                                            | 409,59       |
| CP 2           | 14,11              | 17,26             | 0,44                                           | 2,47                                           | 9381,18                                              | 7,72                                             | 243,57       |
| CP 3           | 13,70              | 23,84             | 0,43                                           | 1,96                                           | 7394,79                                              | 9,43                                             | 326,58       |
| CP 4           | 14,39              | 25,15             | 0,15                                           | 1,51                                           | 6078,62                                              | 11,78                                            | 361,96       |
| CP 5           | 15,82              | 21,42             | 0,26                                           | 1,60                                           | 5252,53                                              | 10,61                                            | 338,83       |
| CP 6           | 14,60              | 26,23             | 0,41                                           | 1,69                                           | 5618,35                                              | 10,41                                            | 383,05       |
| CP 7           | 15,81              | 29,22             | 0,22                                           | 1,27                                           | 4105,30                                              | 13,10                                            | 461,97       |
| CP 8           | 11,76              | 27,26             | 0,50                                           | 2,36                                           | 11269,10                                             | 8,47                                             | 320,46       |
| CP 9           | 16,41              | 30,81             | 0,45                                           | 1,42                                           | 3610,60                                              | 11,55                                            | 505,52       |
| CP 10          | 15,58              | 32,27             | 0,32                                           | 1,35                                           | 4124,17                                              | 12,45                                            | 502,80       |
| Número CPs     | 10                 | 10                | 10                                             | 10                                             | 10                                                   | 10                                               | 10           |
| Média          | 14,81              | 25,91             | 0,3459                                         | 1,708                                          | 6128                                                 | 10,71                                            | 385,4        |
| Desv. Padrão   | 1,403              | 4,438             | 0,1148                                         | 0,4189                                         | 2515                                                 | 1,732                                            | 85,10        |
| Coef.Var.(%)   | 9,473              | 17,13             | 33,19                                          | 24,53                                          | 41,04                                                | 16,17                                            | 22,08        |
| Mínimo         | 11,76              | 17,26             | 0,1530                                         | 1,272                                          | 3611                                                 | 7,723                                            | 243,6        |
| Máximo         | 16,41              | 32,27             | 0,5012                                         | 2,469                                          | 11270                                                | 13,10                                            | 505,5        |

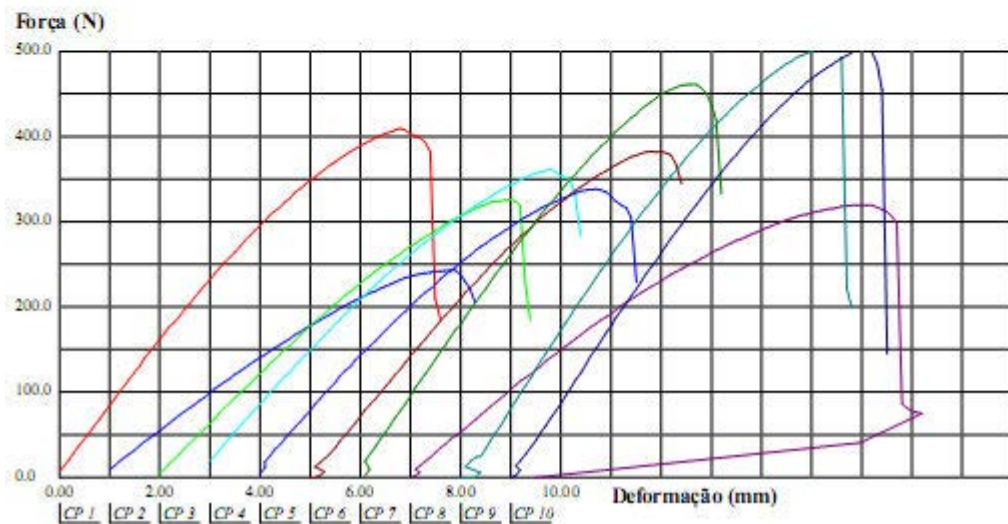


Figura 38: Ensaio de flexão estática com a chapa de situação 3 (15% de casca na camada interna).

Fonte: Laboratório de Propriedades dos Materiais – UNESP – Campus Itapeva.

| Corpo de Prova | Área               | Tensão na Ruptura | Deformação a F10% na fase final do ensaio | Deformação a F40% na fase final do ensaio | Modulo de Elasticidade na fase final do ensaio | Limite de Proporc. na fase final do ensaio | Força Máxima |
|----------------|--------------------|-------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------|
|                | (mm <sup>2</sup> ) | (MPa)             | (mm)                                      | (mm)                                      | (MPa)                                          | (kgf)                                      | (N)          |
| CP 1           | 15,56              | 30,69             | 0,29                                      | 1,36                                      | 4257,91                                        | 12,48                                      | 477,62       |
| CP 2           | 15,13              | 28,19             | 0,26                                      | 1,34                                      | 4483,20                                        | 12,79                                      | 426,59       |
| CP 3           | 16,13              | 19,90             | 0,41                                      | 1,88                                      | 5550,66                                        | 8,98                                       | 321,14       |
| CP 4           | 15,78              | 19,49             | 0,43                                      | 2,09                                      | 6507,45                                        | 8,37                                       | 307,53       |
| CP 5           | 16,41              | 21,73             | 0,49                                      | 1,95                                      | 5377,42                                        | 8,44                                       | 356,52       |
| CP 6           | 13,66              | 30,22             | 0,32                                      | 1,63                                      | 6322,82                                        | 11,12                                      | 412,99       |
| CP 7           | 15,17              | 30,64             | 0,39                                      | 1,46                                      | 4464,69                                        | 11,69                                      | 464,70       |
| CP 8           | 14,24              | 25,79             | 0,28                                      | 1,45                                      | 5326,85                                        | 12,23                                      | 367,40       |
| CP 9           | 13,29              | 18,99             | 0,36                                      | 2,14                                      | 8977,56                                        | 9,06                                       | 252,42       |
| CP 10          | 13,42              | 32,89             | 0,19                                      | 1,20                                      | 4997,92                                        | 14,86                                      | 441,56       |
| Número CPs     | 10                 | 10                | 10                                        | 10                                        | 10                                             | 10                                         | 10           |
| Média          | 14,88              | 25,86             | 0,3443                                    | 1,649                                     | 5627                                           | 11,00                                      | 382,8        |
| Desv. Padrão   | 1,148              | 5,379             | 0,08981                                   | 0,3407                                    | 1397                                           | 2,202                                      | 74,07        |
| Coef.Var.(%)   | 7,712              | 20,80             | 26,09                                     | 20,66                                     | 24,83                                          | 20,02                                      | 19,35        |
| Mínimo         | 13,29              | 18,99             | 0,1925                                    | 1,196                                     | 4258                                           | 8,369                                      | 252,4        |
| Máximo         | 16,41              | 32,89             | 0,4938                                    | 2,140                                     | 8978                                           | 14,86                                      | 477,6        |

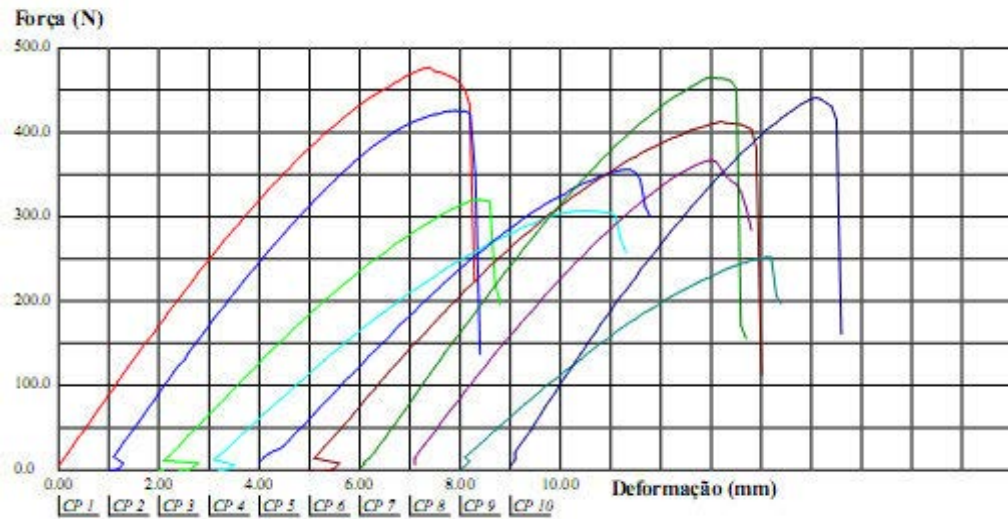


Figura 39: Ensaio de flexão estática com a chapa de situação 4 (20% de casca na camada interna).

Fonte: Laboratório de Propriedades dos Materiais – UNESP – Campus Itapeva.

| Corpo de Prova | largura<br>(mm) | comprimento<br>(mm) | Força<br>@Força Max.<br>(N) | tensão<br>(MPa) | area<br>(mm <sup>2</sup> ) |
|----------------|-----------------|---------------------|-----------------------------|-----------------|----------------------------|
| CP 1           | 50.22           | 49.93               | 4686.89                     | 1.87            | 2507.48                    |
| CP 2           | 50.08           | 49.99               | 4043.50                     | 1.62            | 2503.50                    |
| CP 3           | 50.02           | 49.94               | 3708.53                     | 1.48            | 2498.00                    |
| CP 4           | 49.69           | 50.02               | 5554.96                     | 2.23            | 2485.49                    |
| CP 5           | 50.13           | 50.10               | 5233.61                     | 2.08            | 2511.51                    |
| CP 6           | 49.97           | 49.95               | 5307.14                     | 2.13            | 2496.00                    |
| CP 7           | 50.03           | 50.01               | 4368.94                     | 1.75            | 2502.00                    |
| CP 8           | 50.16           | 50.05               | 5051.82                     | 2.01            | 2510.51                    |
| CP 9           | 50.06           | 50.00               | 4496.26                     | 1.80            | 2503.00                    |
| CP 10          | 50.04           | 50.41               | 5239.05                     | 2.08            | 2522.52                    |
| Número CPs     | 10              | 10                  | 10                          | 10              | 10                         |
| Média          | 50.04           | 50.04               | 4769                        | 1.905           | 2504                       |
| Mediana        | 50.05           | 50.00               | 4869                        | 1.941           | 2503                       |
| Desv. Padrão   | 0.1433          | 0.1399              | 607.0                       | 0.2427          | 10.01                      |
| Coef. Var. (%) | 0.2864          | 0.2796              | 12.73                       | 12.74           | 0.3997                     |
| Mínimo         | 49.69           | 49.93               | 3709                        | 1.485           | 2485                       |
| Máximo         | 50.22           | 50.41               | 5555                        | 2.235           | 2523                       |

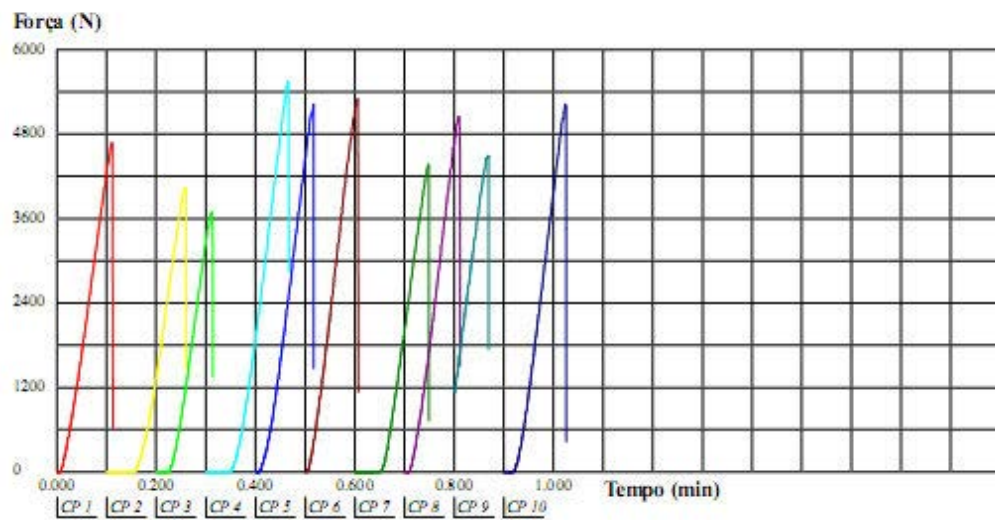


Figura 40: Ensaio de tração perpendicular com a chapa de situação 1 (5% de casca na camada interna).  
 Fonte: Laboratório de Propriedades dos Materiais – UNESP – Campus Itapeva.

| Corpo de Prova | largura<br>(mm) | comprimento<br>(mm) | area<br>(mm <sup>2</sup> ) | Força<br>@Força Max.<br>(N) | tensão<br>(MPa) |
|----------------|-----------------|---------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------|
| CP 1           | 50,50           | 50,22               | 2536,11                    | 86,47                       | 0,03            |
| CP 2           | 50,45           | 50,00               | 2522,50                    | 4865,95                     | 1,93            |
| CP 3           | 50,46           | 50,12               | 2529,06                    | 4202,82                     | 1,66            |
| CP 4           | 50,50           | 50,19               | 2534,59                    | 4207,58                     | 1,66            |
| CP 5           | 50,46           | 50,18               | 2532,08                    | 3321,81                     | 1,31            |
| CP 6           | 50,42           | 50,05               | 2523,52                    | 4876,17                     | 1,93            |
| CP 7           | 50,45           | 50,00               | 2522,50                    | 4611,32                     | 1,83            |
| CP 8           | 50,46           | 50,13               | 2529,56                    | 5095,40                     | 2,01            |
| CP 9           | 50,38           | 50,11               | 2524,54                    | 4011,50                     | 1,59            |
| CP 10          | 50,41           | 50,11               | 2526,05                    | 5071,57                     | 2,01            |
| CP 11          | 50,50           | 50,22               | 2536,11                    | 4557,53                     | 1,80            |
| Número CPs     | 11              | 11                  | 11                         | 11                          | 11              |
| Média          | 50,45           | 50,12               | 2529                       | 4083                        | 1,615           |
| Mediana        | 50,46           | 50,12               | 2529                       | 4558                        | 1,797           |
| Desv. Padrão   | 0,03880         | 0,07905             | 5,337                      | 1426                        | 0,5646          |
| Coef.Var.(%)   | 0,07690         | 0,1577              | 0,2111                     | 34,93                       | 34,96           |
| Mínimo         | 50,38           | 50,00               | 2523                       | 86,47                       | 0,03409         |
| Máximo         | 50,50           | 50,22               | 2536                       | 5095                        | 2,014           |

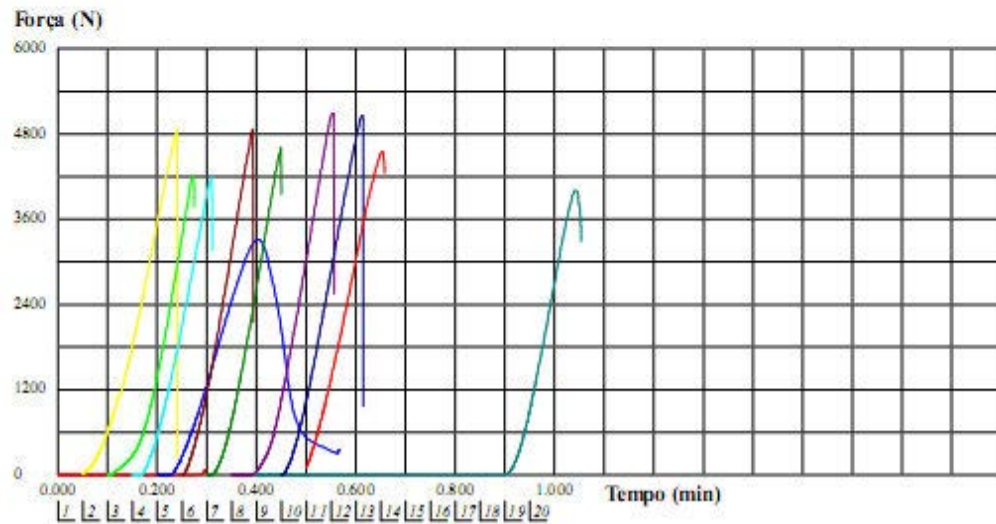


Figura 41: Ensaio de tração perpendicular com a chapa de situação 2 (10% de casca na camada interna).

Fonte: Laboratório de Propriedades dos Materiais – UNESP – Campus Itapeva.

Obs.: Neste ensaio ocorreu um erro com o primeiro corpo-de-prova (CP1), por isso o ensaio foi refeito (CP 11).

| Corpo de Prova | largura<br>(mm) | comprimento<br>(mm) | area<br>(mm <sup>2</sup> ) | Força<br>@Força Max.<br>(N) | tensão<br>(MPa) |
|----------------|-----------------|---------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------|
| CP 1           | 50.54           | 50.18               | 2536.10                    | 4701.19                     | 1.85            |
| CP 2           | 50.51           | 49.94               | 2522.47                    | 5084.50                     | 2.02            |
| CP 3           | 50.53           | 50.10               | 2531.55                    | 5272.41                     | 2.08            |
| CP 4           | 50.41           | 49.96               | 2518.48                    | 4424.77                     | 1.76            |
| CP 5           | 50.49           | 49.86               | 2517.43                    | 4881.61                     | 1.94            |
| CP 6           | 50.40           | 50.12               | 2526.05                    | 5104.93                     | 2.02            |
| CP 7           | 50.43           | 49.98               | 2520.49                    | 4530.30                     | 1.80            |
| CP 8           | 50.41           | 50.13               | 2527.05                    | 5002.12                     | 1.98            |
| CP 9           | 50.47           | 49.84               | 2515.42                    | 4292.01                     | 1.71            |
| CP 10          | 50.37           | 50.09               | 2523.03                    | 4335.58                     | 1.72            |
| Número CPs     | 10              | 10                  | 10                         | 10                          | 10              |
| Média          | 50.46           | 50.02               | 2524                       | 4763                        | 1.887           |
| Mediana        | 50.45           | 50.03               | 2523                       | 4791                        | 1.896           |
| Desv. Padrão   | 0.05985         | 0.1195              | 6.491                      | 354.0                       | 0.1379          |
| Coef.Var.(%)   | 0.1186          | 0.2390              | 0.2572                     | 7.433                       | 7.309           |
| Mínimo         | 50.37           | 49.84               | 2515                       | 4292                        | 1.706           |
| Máximo         | 50.54           | 50.18               | 2536                       | 5272                        | 2.083           |

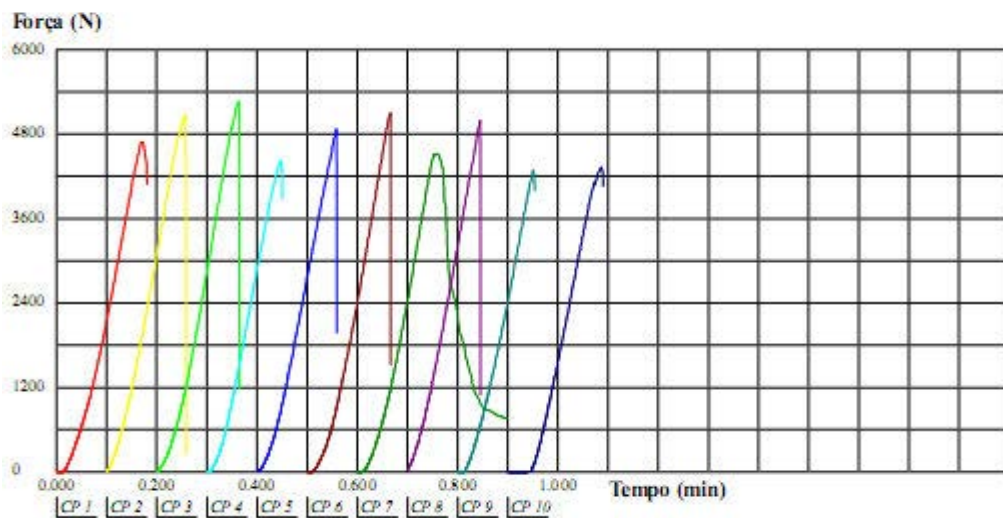


Figura 42: Ensaio de tração perpendicular com a chapa de situação 3 (15% de casca na camada interna).  
 Fonte: Laboratório de Propriedades dos Materiais – UNESP – Campus Itapeva.

| Corpo de Prova | largura<br>(mm) | comprimento<br>(mm) | area<br>(mm <sup>2</sup> ) | Força<br>@Força Max.<br>(N) | tensão<br>(MPa) |
|----------------|-----------------|---------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------|
| CP 1           | 50,51           | 50,13               | 2532,07                    | 5178,46                     | 2,05            |
| CP 2           | 50,44           | 50,10               | 2527,04                    | 4758,38                     | 1,88            |
| CP 3           | 50,44           | 50,19               | 2531,58                    | 4495,58                     | 1,78            |
| CP 4           | 50,50           | 50,09               | 2529,54                    | 5119,22                     | 2,02            |
| CP 5           | 50,47           | 50,13               | 2530,06                    | 4700,51                     | 1,86            |
| CP 6           | 49,87           | 50,19               | 2502,98                    | 3752,78                     | 1,50            |
| CP 7           | 50,44           | 50,18               | 2531,08                    | 4023,76                     | 1,59            |
| CP 8           | 50,31           | 50,23               | 2527,07                    | 5156,67                     | 2,04            |
| CP 9           | 50,39           | 50,23               | 2531,09                    | 4955,82                     | 1,96            |
| CP 10          | 50,44           | 50,22               | 2533,10                    | 4133,37                     | 1,63            |
| Número CPs     | 10              | 10                  | 10                         | 10                          | 10              |
| Média          | 50,38           | 50,17               | 2528                       | 4627                        | 1,830           |
| Mediana        | 50,44           | 50,18               | 2531                       | 4729                        | 1,870           |
| Desv. Padrão   | 0,1882          | 0,05280             | 8,864                      | 510,6                       | 0,1993          |
| Coef.Var.(%)   | 0,3736          | 0,1052              | 0,3507                     | 11,04                       | 10,89           |
| Mínimo         | 49,87           | 50,09               | 2503                       | 3753                        | 1,499           |
| Máximo         | 50,51           | 50,23               | 2533                       | 5178                        | 2,045           |

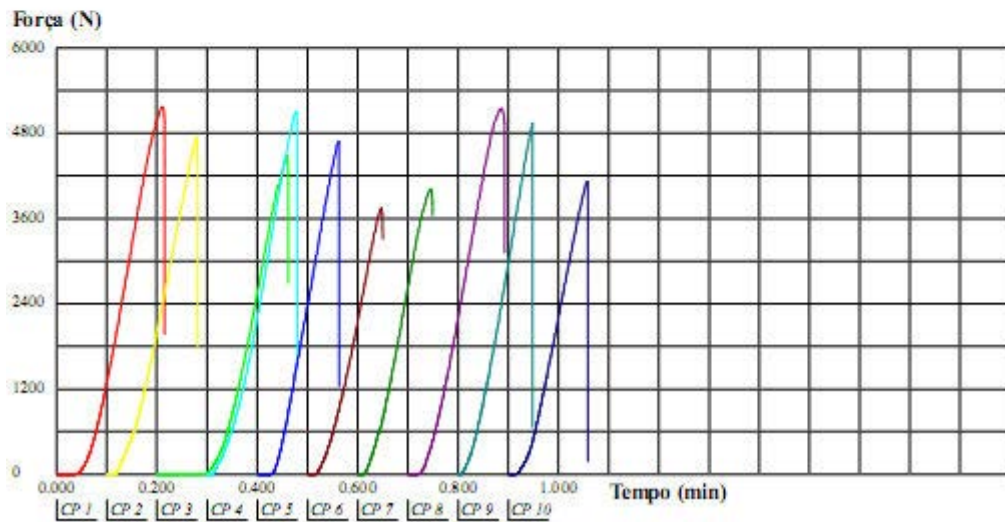


Figura 43: Ensaio de tração perpendicular com a chapa de situação 4 (20% de casca na camada interna).

Fonte: Laboratório de Propriedades dos Materiais – UNESP – Campus Itapeva.