



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**  
**CENTRO TECNOLÓGICO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**Influência de três tipos de tratamentos físicos na  
resistência à compressão de compósitos cimento-  
madeira à base de resíduos de serraria**

Autor: Arquiteto e Urbanista Alexandre  
Martins de Lima

Orientador: Prof. Dr. Alcebíades Negrão  
Macêdo

Co-Orientador: Prof. Dr. Osmar José Romeiro  
de Aguiar

Belém, 2005

## FICHA CATALOGRÁFICA

Lima, Alexandre Martins de.

Avaliação de tratamentos físicos na resistência à compressão de compósito cimento-madeira à base de resíduos de serraria da Zona Metropolitana de Belém. / Alexandre Martins de Lima. – Belém, Pará : 2005.

Orientador: Prof. Dr. Alcebíades Negrão Macêdo  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará.

1. Cimento-madeira. 2. tratamentos físicos. 3. resistência à compressão. I. Macedo, Alcebíades Negrão. II. Universidade Federal do Pará. III. Avaliação de tratamentos físicos na resistência à compressão de compósito cimento-madeira à base de resíduos de serraria da Zona Metropolitana de Belém.



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**  
**CENTRO TECNOLÓGICO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**Influência de três tipos de tratamentos físicos na  
resistência à compressão de compósitos cimento-  
madeira à base de resíduos de serraria**

**Autor: Arquiteto e Urbanista Alexandre Martins de Lima**

Orientador: Prof. Dr. Alcebíades Negrão Macêdo

Co-Orientador: Prof. Dr. Osmar José Romeiro de Aguiar

Curso: Engenharia Civil

Área de Concentração: Estruturas e Construção Civil

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Belém, 2005

Pará – Brasil

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**  
**CENTRO TECNOLÓGICO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Influência de três tipos de tratamentos físicos na  
resistência à compressão de compósitos cimento-  
madeira à base de resíduos de serraria**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL e aprovada em sua forma final pelo Orientador, Co-Orientador, pelos Membros da Banca Examinadora e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará.

Autor: Arquiteto e Urbanista Alexandre Martins de Lima

---

Orientador: Prof. Dr. Alcebíades Negrão Macedo  
Instituição: Universidade Federal do Pará

---

Co-Orientador: Prof. Dr. Osmar José Romeiro de Aguiar  
Instituição: Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias (EMBRAPA)-Pará

---

Prof. Dr. Bernardo Borges Pompeu Neto  
Instituição: Universidade Federal do Pará

---

Prof. Dr. Paulo Sérgio Lima Souza  
Instituição: Universidade Federal do Pará

---

Prof. Dr. Manoel Diniz Peres  
Instituição: Universidade Federal do Pará

*Para minha Maria. Meu sol. Meu colo, meu porto mais que seguro. Exemplo de força, dignidade, perseverança e resignação. Obrigado por sua presença constante em minha vida guiando e amparando meus passos sempre falíveis.*

## **Agradecimentos**

Os caminhos que conduzem ao avanço da ciência são infinitamente amplos; alguns nos conduzem a resultados esperados, outros, a agradáveis surpresas. O presente trabalho de pesquisa, que um dia iniciou compelido pela curiosidade, tornou-se reflexo de minha compulsão por conhecimento. Na reta final, não poderia deixar de demonstrar minha mais profunda gratidão aos que estiveram junto comigo durante este exaustivo ritmo de concepção.

Antes de tudo, não tenho como expressar meus mais profundos sentimentos de gratidão a Deus por oportunizar todos os momentos de meu crescimento espiritual e por me trazer alento nos instantes mais árduos de minha caminhada. Agradeço à Maria das Graças. Meu sol, razão e sentido de todo meu esforço. Mesmo nos momentos de maior distância e completa ausência, tu observava meus passos. É na tua resignação e na tua inesgotável fonte de amor materno que encontro força e renovo meus ânimos para superar as deslealdades da vida, principalmente daquelas que vêm de onde menos se espera.

A meu orientador, Dr. Alcebíades Negrão Macêdo, e meu co-orientador, Dr. Osmar José Romeiro de Aguiar, por sua dedicação, paciência e infindável estímulo nos momentos mais difíceis desta empreitada. Agradeço profundamente por terem abraçado meu projeto e terem acompanhado seu crescimento com tanto carinho.

A Fábio de Oliveira Fonseca, por sua compreensão, amizade incondicional e infalível ajuda na revisão bibliográfica, ensaios laboratoriais, tratamento de dados e formatação da presente dissertação, e principalmente por sempre encontrar em ti um ombro mais que amigo, e um braço mais forte que de um irmão. Minha dívida contigo é eterna, pois também és responsável por esta realização.

Ao Prof. Dr. Bernardo Borges Pompeu Neto, que, prestimosamente, dedicou algumas de suas horas à leitura da presente pesquisa. Agradeço imensamente por todas as críticas e observações feitas, e principalmente por todas as palavras de estímulo recebidas até a conclusão desta dissertação. A tua atenção, velho amigo, valeu ouro.

Agradeço ao Prof. Dr. Paulo Sérgio Lima Souza, por sua infalível paciência na revisão da presente realização além das certeiras e construtivas críticas que tão bem fizeram ao desenvolvimento do trabalho. A você, meus mais sinceros agradecimentos e honesta admiração.

A Manoel Diniz Peres, que no apagar das luzes, deu-me, com sua espirituosa presença e sua gargalhada contagiante, novas forças para dar os últimos passos rumo à finalização desta pesquisa. Tua inesgotável paciência e dedicação foram muralhas nas quais me apoiei. Sinto-me honrado por me chamares “amigo”. Agradeço imensamente por todas as horas que consagrastes a me manter firme no trajeto do trabalho.

Ao amigo e mestre Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro por todo o incentivo, paciência, apoio e principalmente por acreditar na minha capacidade de realização desde meus primeiros instantes tão incertos no Programa de Pós Graduação. Por todas as horas de ajuda inestimável, agradeço-te, amigo. Tua dedicação é indelével.

Aos técnicos do Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará – Maneca e Natalino – e da Universidade da Amazônia – Beto e Aílton – por terem participado, mesmo nos bastidores, desta humílima realização.

Agradeço à MBT, subsidiária da Degussa Chemicals, por ter gentilmente cedido os aditivos aceleradores, e ao Cimento Poty S/A, subdivisão do Grupo Votorantim, por ter generosamente cedido o cimento, com suas respectivas análises, para esta dissertação. Sem estes preciosos apoios, o desenvolvimento do trabalho seria uma tarefa particularmente árdua.

Aos professores e amigos, certamente eternos, da primeira e da segunda turma de Mestrado em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará.

Um agradecimento especial para a primeira turma de Materiais do Mestrado em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará: Fábio de Oliveira Fonseca, Max Tonny Lopes Andrade, Jefferson Lima, Mário Guzzo Jr., e Alessandre Elias Francês. Obrigado pelos momentos de descontração, de aprendizagem e crescimento. Ainda que vários revezes tenham nos fragmentado, seremos sempre “**os primeiros**”!



## Resumo

**Lima**, Alexandre Martins de. Influência de três tipos de tratamentos físicos na resistência à compressão de compósitos cimento-madeira à base de resíduos de serraria. Belém, Departamento de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Pará, 2005. (Dissertação de Mestrado).143 pg.

No presente trabalho de pesquisa analisou-se o efeito de três tratamentos físicos empregados em resíduos de serraria no comportamento à compressão de compósitos cimento-madeira. Foi utilizado resíduo de composição variada (dicotiledôneas) coletado em serrarias da Zona Metropolitana de Belém, e estudou-se o efeito dos seguintes tratamentos: secagem em estufa, banho térmico e a mineralização com sulfato de alumínio. O aporte inicial da pesquisa foi o levantamento do referencial teórico como suporte para o programa experimental. Em seguida, os materiais constituintes do compósito foram caracterizados segundo as Normas Brasileiras vigentes, e depois de homogeneizados, foram conduzidos ensaios no estado fresco. Os ensaios no estado endurecido foram realizados de forma tal que a característica mecânica observada para a avaliação do efeito dos referidos tratamentos foi a resistência à compressão. Os resultados de tensão na compressão indicaram que os resíduos utilizados são inibitórios à hidratação do cimento, bem como influenciam negativamente a resistência à compressão; tais efeitos estão relacionados com a absorção de água pelos resíduos de madeira, e posterior liberação na matriz. Os resíduos tratados com secagem em estufa proporcionaram as menores resistências à compressão observadas para os compósitos confeccionados; o tratamento de banho térmico e o tratamento de mineralização apresentaram melhor desempenho que o primeiro, contudo, mostraram-se estatisticamente equivalentes a partir de 3 dias de idade, fazendo com que a instância decisória em utilizar um ou outro recaia sobre variáveis distintas do desempenho à compressão.

**Palavras-Chave:** cimento-madeira, tratamentos físicos, resistência à compressão.

## **Abstract**

**Lima**, Alexandre Martins de. Influência de três tipos de tratamentos físicos na resistência à compressão de compósitos cimento-madeira à base de resíduos de serraria. Belém, Departamento de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Pará, 2005. (Dissertação de Mestrado).143 pg.

In the present research work, the effect of the type of physical treatment in the resistance to compression of composites cement-wood was analyzed. Residues of variegated compositions (hardwood) collected at sawmills of the Metropolitan area of Belém were used, and the effects of the following treatments were studied: drying in stove, thermal bath and the mineralization with aluminum sulfate. The first step of the research was the survey of the theoretical references as support for the experimental program. Next, the constituent materials of the composite were characterized according to methods prescribed by the Brazilian Norms and after being homogenized, lab tests were carried out in the fresh state. The tests in the hardened state were driven in such a way that the mechanical characteristic observed for the evaluation of the effect of the referred treatments was the tensile strength. The results indicated that the used residues inhibit the hydration of the cement matrix, as well as they influence the resistance negatively the tensile strength. The residues treated with drying in stove provided the smallest resistances to the compression observed for the composites; the treatment of thermal bath and the treatment of mineralization presented better results. However, even presenting a slight difference among the medium values for the rupture tensions, they presented statistical equivalence, and they corroborated the statement that the treatment typology used in the residues is preponderant factor to mitigate the harmful effects of the extractives of the wood in the resistance to compression of the mortars.

**Keywords:** wood-cement, physical treatments, mechanical strength.

## Sumário

Lista de Figuras.....	xiii
Lista de Tabelas.....	xvi
Lista de Abreviaturas, Siglas e Símbolos.....	xviii
<b>1 – Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Considerações iniciais.....	1
1.2 Justificativa da Pesquisa.....	4
1.3 Objetivos.....	6
1.3.1 Objetivo Geral.....	6
1.3.2 Objetivos Específicos.....	6
1.4 Limitações da Pesquisa.....	7
1.5 Estrutura da Pesquisa.....	8
<b>2 – Revisão da Literatura</b>	<b>9</b>
2.1 Materiais Compósitos.....	9
2.2 Usos e aplicações dos Compósitos.....	10
2.3 Natureza dos Compósitos.....	11
2.3.1 Compósitos Naturais.....	11
2.3.2 Compósitos Artificiais.....	11
2.4 Associação de Matrizes e Fibras.....	14
2.5 Materiais orgânicos como reforços em matrizes de cimento Portland.....	15
2.6 Principais fatores que influenciam a produção do compósito cimento- madeira.....	17
2.6.1 Matrizes.....	17
2.6.1.1 Cimento Portland.....	18
2.6.1.2 Composição básica do clínquer e tipos de cimento.....	18

2.6.1.3	Mecanismos de hidratação do cimento.....	20
2.6.1.4	Calor de hidratação.....	23
2.6.2	Tipologia de fibra de reforço.....	26
2.6.2.1	Madeira.....	27
2.6.2.2	Extrativos das madeiras.....	29
2.6.3	Orientação das fibras durante a confecção do compósito.....	33
2.6.4	Vazios e absorção de água pela fibra.....	33
2.6.5	A interface fibra/matriz no compósito cimento/madeira.....	34
2.7	Compatibilidade química entre fibra/matriz.....	36
 <b>3 – Programa Experimental</b>		 40
3.1	Metodologia de Pesquisa bibliográfica para suporte ao programa experimental.....	40
3.2	Metodologia da Pesquisa laboratorial.....	41
3.3	Caracterização dos materiais empregados.....	41
3.3.1	Areia.....	41
3.3.2	Aglomerante mineral.....	45
3.3.3	Água.....	46
3.3.4	Aditivo.....	47
3.3.5	Resíduos de madeira.....	48
3.3.5.1	Teor de umidade nos resíduos <i>in natura</i> .....	50
3.3.5.2	Massa Unitária do resíduo <i>in natura</i> no estado solto e seco.....	51
3.3.5.4	Peneiramento do Material -Caracterização Granulométrica do resíduo <i>in natura</i> .....	51
3.4	Tratamento dos resíduos de madeira.....	54
3.4.1	Secagem em estufa (SE).....	54
3.4.2	Banho térmico (B).....	58
3.4.3	Mineralização (M).....	62
3.5	Traços adotados para o compósito.....	66
3.6	Instrumentação e equipamentos.....	68
3.7	Moldagem dos corpos de prova.....	70
3.8	Ensaio Realizados.....	73
3.8.1	Ensaio de Índice de Consistência.....	73

3.8.2	Ensaio de Resistência à Compressão.....	74
<b>4</b>	<b>– Resultados e Discussões</b>	<b>76</b>
4.1	Resultados dos ensaios no Estado Fresco.....	76
4.1.1	Resultados dos ensaios de Índice de Consistência.....	76
4.2.	Resultados dos ensaios no Estado Endurecido.....	79
4.2.1	Traço Piloto.....	80
4.2.2	Traço Compósito SE.....	82
4.2.3	Traço Compósito BT.....	84
4.2.4	Traço Compósito M.....	87
4.2.5	Comparativo dos traços moldados.....	89
<b>5</b>	<b>– Conclusões e sugestões para pesquisas futuras</b>	<b>95</b>
5.1	Conclusões dos ensaios no Estado Fresco.....	95
5.1.1	Índice de Consistência.....	95
5.2	Conclusões dos ensaios no Estado Endurecido.....	96
5.2.1	Traço TP.....	96
5.2.2	Traço SE.....	97
5.2.3	Traço BT.....	97
5.2.4	Traço M.....	99
5.3	Sugestões para pesquisas futuras.....	100
<b>6</b>	<b>– Referências Bibliográficas</b>	<b>102</b>
<b>Anexos</b>		
<b>A</b>	Boletim de Análises Físicas de Cimento CPII-Z 32.....	113
<b>B</b>	Boletim de Análises de Cimento – Ensaio Químico, Ensaio Físico e Mecânicos, Ensaio de Resistência à Compressão.....	116
<b>C</b>	Análise Físico-química de água subterrânea e efluentes	119
<b>D</b>	Resultados dos Ensaio de resistência à compressão para os traços moldados.	121
<b>E</b>	Estatística descritiva para os traços moldados.....	122
<b>F</b>	Análise de dispersão para os traços moldados.....	128

<b>G</b>	Análise de variância para os traços moldados.....	130
----------	---	-----

## Lista de Figuras

### 2 – Revisão da Literatura

<b>Figura 01</b>	Exemplo de associação de fibras em matriz polimérica para fabricação de compósito laminado (Fonte: SOUZA, 2003).....	13
<b>Figura 02</b>	MEV. Imagens de elétrons secundários de matriz de cimento Portland reforçada com polpa de <i>Pinus Radiata</i> (Fonte: SAVASTANO, 2000)..	14
<b>Figura 03</b>	Incompatibilidade entre a fibra do bambu e a matriz de cimento Portland (Fonte: Disponível em: < <a href="http://www.biokreto.com.br">www.biokreto.com.br</a> > Acesso em 21/11/2001).....	16
<b>Figura 04</b>	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) de amostra fraturada de pasta de cimento Portland com 3 dias de idade – formação das primeiras agulhas de etringita (fonte: METHA & MONTEIRO, 1994)..	22
<b>Figura 05</b>	Microscopia eletrônica de varredura (mev) de amostra fraturada de pasta de cimento Portland com 3 dias de idade – formação dos cristais de C – S – H, pouco cristalinos e de morfologia fibrosa (Fonte: METHA & MONTEIRO, 1994).....	23
<b>Figura 06</b>	Gráfico característico de taxa de liberação de calor durante a hidratação de uma pasta de cimento Portland (fonte: MEHTA & MONTEIRO, 1994).....	24
<b>Figura 07</b>	Taxa de hidratação do cimento e do cimento-madeira durante as primeiras horas de hidratação (Fonte: HACMI e CAMPBELL apud LATORRACA, 2000).....	25
<b>Figura 08</b>	Taxa de hidratação do cimento e do cimento-madeira após estágios de enrijecimento e endurecimento (Fonte: HACMI e CAMPBELL apud LATORRACA, 2000).....	25
<b>Figura 09</b>	Corte do tronco de um vegetal superior ilustrando suas várias camadas (Fonte: Disponível em: < <a href="http://www.fpl.us">www.fpl.us</a> > Acesso em 28/09/2004).....	28

<b>Figura 10</b>	Imagem por elétrons retroespalhados em compósito de cimento Portland e fibra de coco aos 28 dias. A seta indica a zona de transição fissurada. (Fonte: SAVASTANO, 1992).....	35
------------------	--	----

### 3 – Materiais e Métodos

<b>Figura 11</b>	Peneiradeira mecânica utilizada para caracterização granulométrica da areia .....	43
<b>Figura 12</b>	Curva granulométrica da areia utilizada no programa experimental.....	44
<b>Figura 13</b>	Histograma de porcentagens retidas individuais nas peneiras de Série Normal para a areia de Ourém.....	44
<b>Figura 14</b>	Resíduos produzidos durante o corte de peças de madeira.....	49
<b>Figura 15</b>	Resíduos produzidos após corte de peças de madeira.....	49
<b>Figura 16</b>	Aspecto da dimensão e da composição variegada dos resíduos coletados.....	49
<b>Figura 17</b>	Aspecto visual das amostras das espécies botânicas constituintes do resíduo coletado. Observa-se a diferenciação cromática, propriedade organoléptica que varia conforme a espécie botânica.....	50
<b>Figura 18</b>	Curva granulométrica do resíduo de madeira <i>in natura</i> .....	53
<b>Figura 19</b>	Histograma de porcentagem retida nas peneiras para o resíduo de madeira <i>in natura</i> .....	53
<b>Figura 20</b>	Retirada do resíduo de madeira da estufa após secagem sob temperatura controlada.....	54
<b>Figura 21</b>	Curva granulométrica do resíduo de madeira seco em estufa (SE).....	56
<b>Figura 22</b>	Histograma de porcentagem retida nas peneiras para o resíduo de madeira seco em estufa (SE).....	57
<b>Figura 23</b>	Aspecto dos resíduos de madeira acondicionados em embalagens plásticas vedadas com filme de pvc após tratamento SE.....	57
<b>Figura 24</b>	Aspecto visual dos efluentes do resíduo de madeira coletado após o banho térmico.....	59
<b>Figura 25</b>	Aspecto do resíduo de madeira antes do tratamento com banho térmico.....	60
<b>Figura 26</b>	Aspecto do resíduo de madeira depois do tratamento com banho térmico.....	60



<b>Figura 27</b>	Curva granulométrica do resíduo de madeira tratado com banho térmico (BT).....	61
<b>Figura 28</b>	Histograma de porcentagem retida nas peneiras para o resíduo tratado com banho térmico (BT).....	62
<b>Figura 29</b>	Aspecto do recipiente metálico e da água com sulfato de alumínio .....	64
<b>Figura 30</b>	Curva granulométrica do resíduo de madeira tratado com mineralização (M).....	65
<b>Figura 31</b>	Histograma de porcentagem retida nas peneiras para o resíduo tratado com mineralização (M).....	65
<b>Figura 32</b>	Argamassadeira utilizada no programa experimental .....	69
<b>Figura 33</b>	Aspecto da fôrma e mesa para ensaio de consistência.....	69
<b>Figura 34</b>	Prensa EMIC SSH30, com célula Trd 30 utilizada nos testes destrutivos do programa experimental.....	70
<b>Figura 35</b>	Água aditivada sendo parcial e gradualmente adicionada a mistura cimento-areia.....	71
<b>Figura 36</b>	Aspecto do resíduo de madeira adicionado à argamassa de cimento.....	72
<b>Figura 37</b>	Aspecto de uma série moldada em formas cilíndricas e cobertas com laminas de vidro.....	72
<b>Figura 38</b>	Adensamento da argamassa TP em fôrma específica para a realização do teste de consistência.....	74
<b>Figura 39</b>	Aferição do espalhamento da argamassa TP.....	74
 <b>4 – Resultados e Discussões</b>		
<b>Figura 40</b>	Gráfico de perda de consistência para os traços moldados.....	77
<b>Figura 41</b>	Histograma de diferença entre consistência inicial e final para os traços moldados.....	78
<b>Figura 42</b>	Gráfico de tensão de ruptura para a mistura TP.....	81
<b>Figura 43</b>	Gráfico de tensão de ruptura para a mistura SE.....	83
<b>Figura 44</b>	Gráfico de tensão de ruptura para a mistura BT.....	85
<b>Figura 45</b>	Gráfico de tensão de ruptura para a mistura M.....	88
<b>Figura 46</b>	Gráfico comparativo de tensão de ruptura para os traços moldados.....	89

## Lista de Tabelas

### 2 – Revisão da Literatura

<b>Tabela 01</b>	Principais componentes do clínquer, seus percentuais e suas propriedades (fonte: BATTAGIN & ESPER, 1988 <i>apud</i> LATORRACA 2000).....	20
------------------	--	----

### 3 – Materiais e Métodos

<b>Tabela 02</b>	Resultado dos Ensaios de Caracterização da areia utilizada no programa experimental.....	42
<b>Tabela 03</b>	Granulometria da areia proveniente de Ourém-Pa.....	43
<b>Tabela 04</b>	Ensaios químicos, físicos e mecânicos para caracterização do cimento utilizado no programa experimental.....	46
<b>Tabela 05</b>	Tabela de análise físico-química da água do Laboratório de Engenharia Civil da UFPA.....	47
<b>Tabela 06</b>	Dados técnicos do aditivo isento de cloreto, fornecidos pelo fabricante (MBT BRASIL – Degussa Construction Chemicals).....	48
<b>Tabela 07</b>	Relação das espécies botânicas encontradas nos resíduos coletados (EMBRAPA, 2005).....	50
<b>Tabela 08</b>	Distribuição granulométrica do resíduo de madeira <i>in natura</i> .....	52
<b>Tabela 09</b>	Distribuição granulométrica do resíduo de madeira após secagem em estufa.....	55
<b>Tabela 10</b>	Análise Físico-química dos efluentes da água fervida com resíduo de madeira.....	59
<b>Tabela 11</b>	Distribuição granulométrica do resíduo de madeira após tratamento de banho térmico.....	61

<b>Tabela 12</b>	Distribuição granulométrica do resíduo de madeira após tratamento com mineralização.....	64
<b>Tabela 13</b>	Resumo da composição dos traços moldados.....	68

#### 4 – Resultados e Discussões

<b>Tabela 14</b>	Resultados dos ensaios de consistência para os traços moldados.....	77
<b>Tabela 15</b>	Valores das tensões de ruptura para idades de rompimento da mistura TP.....	80
<b>Tabela 16</b>	Valores das médias das tensões de ruptura para idades de rompimento da mistura TP.....	80
<b>Tabela 17</b>	Valores das tensões de ruptura para idades de rompimento da mistura SE.....	82
<b>Tabela 18</b>	Valores das médias das tensões de ruptura para idades de rompimento da mistura SE.....	82
<b>Tabela 19</b>	Valores das tensões de ruptura para idades de rompimento da mistura BT.....	84
<b>Tabela 20</b>	Valores das médias das tensões de ruptura para idades de rompimento da mistura BT.....	84
<b>Tabela 21</b>	Valores das tensões de ruptura para idades de rompimento da mistura M.....	87
<b>Tabela 22</b>	Valores das médias das tensões de ruptura para idades de rompimento da mistura M.....	87

## Lista de Abreviaturas, Siglas e Símbolos

m <sup>3</sup>	Metro Cúbico
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
J/g.	Joule por grama
CPC's	Corpos de prova cilíndricos
UFPA	Universidade Federal do Pará
UNAMA	Universidade da Amazônia
EMBRAPA	Empresa brasileiras de Pesquisas Agropecuárias
NBR	Norma Brasileira
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
LCC	Laboratório de Construção Civil (UFPA)
LEQ	Laboratório de Engenharia Química (UFPA)
a/c	(Relação) Água -cimento
kg.	Kilograma
l.	Litro
g/cm <sup>3</sup>	Gramas por centímetro cúbico
g/l	Gramas por litro

# **1 Introdução**

## **1.1 Considerações iniciais**

A utilização de biomassa vegetal permeou o desenvolvimento da grande maioria das sociedades humanas, mesmo naquelas em que a situação geográfica não é favorável à sua obtenção. Em verdade, o uso deste insumo data de muito tempo. A historiografia é pródiga em evidenciar que os povos egípcios já utilizavam fibras, como a palha e o papiro, para reduzir a presença de fissuras em tijolos de adobe e torná-los mais resistentes e leves. Existem ainda evidências de que, há aproximadamente 5000 anos, os povos da antiguidade recorriam freqüentemente a outras fibras, como as de asbesto, que eram utilizadas para reforçar utensílios confeccionados com argila, e as fibras de arroz, utilizadas na China para a produção de papéis.

No período colonial brasileiro, os lusos adicionavam fibras vegetais às alvenarias de taipa de mão e taipa de pilão. Com a mudança na técnica construtiva, os portugueses também adicionavam fibras no barro para moldagem de tijolos, tornando assim as construções mais leves e mais perenes. Ainda hoje essa técnica construtiva é utilizada no meio rural brasileiro para o fabrico de pequenas habitações.

No cenário contemporâneo nacional, a biomassa vegetal encontra grande aplicabilidade, como na construção civil (em fôrmas para concreto, pontaletes, escoras, peças estruturais das mais variadas ordens, revestimento de parede, piso e fôrro, esquadrias, etc.), na indústria moveleira (mobiliários de sala, dormitórios, cozinhas, etc.), e, principalmente na geração de energia, através sua combustão, onde anualmente são consumidos em torno de  $280 \times 10^6 \text{ m}^3$  de biomassa florestal (LIMA, 2001).

Contando com a segunda área florestal do globo, o Brasil tem na biomassa vegetal, principalmente a madeira, uma de suas maiores fronteiras econômicas. Contudo, o setor extrativista não apresenta elementos muito favoráveis ao meio ambiente, especialmente o amazônico, uma vez que grandes impactos ambientais originam-se dos desmatamentos para retirada da madeira ou para aumento das atividades agropastoris, sem que haja, no entanto, preocupações com reflorestamento.

Quando acontecem especificamente para extração de madeiras, os desmatamentos trazem no seu bojo a perspectiva de extinção de algumas espécies, como já ocorrem com o Cedro (*Cedrela Odorata*) e o Mogno (*Swietenia macrophylla King*). Seguido da retirada do capoteamento vegetal, o solo amazônico lixivia e posteriormente lateriza, perdendo grande parte de sua fertilidade. Outros problemas são gerados pelas queimadas, que liberam CO<sub>2</sub> e cinzas na atmosfera.

Nas indústrias de beneficiamento das madeiras extraídas (serrarias, indústrias moveleiras e indústrias de transformação) o quadro também não é cômodo, devido principalmente ao baixo nível de aproveitamento do material. Em geral, a média de rendimento das serrarias gira em torno de 50% em volume, ou seja, cada metro cúbico de madeira em tora que entra no processo de produção gera 0,5 m<sup>3</sup> de madeira serrada, e o restante é transformado em resíduos, tornando-se verdadeiros transtornos para a operacionalidade nos pátios de serrarias e empresas madeireiras (UHL *et al*, 1991; ULH e BUSCHBACHER, 1991).

A maior parte desses resíduos não encontra utilização adequada. Na grande maioria das vezes, eles servem para o recobrimento de pisos em currais de criação de gado, em piso de aviários e estábulos, ou como adubo para fins hortícolas. De outra forma, são simplesmente queimados ou depositados em locais públicos, agravando de forma acentuada a problemática da poluição ambiental. Apesar deste quadro geral não muito favorável ao reaproveitamento dos resíduos de madeira, atualmente no Brasil, trabalhos desenvolvidos por pesquisadores como BERALDO (BERALDO *et al*, 1996), SAVASTANO (2000) e LATORRACA (2000) apontam a possibilidade de uso da madeira mesmo na forma de resíduo.

Com efeito, o resíduo de madeira pode ser utilizado para fabricação de painéis prensados, ou mesmo como reforço, quando associado a aglomerantes minerais (SARMIENTO e FREIRE, 1996). Quando esta associação de fibras ou partículas de madeira é feita com uma matriz de cimento Portland, produz-se um material compósito comumente denominado cimento-madeira.

O compósito cimento-madeira é um dos poucos materiais estruturais efetivamente resistentes a incêndios e à degradação por influência do meio ou por ação de xilófagos, uma vez que a matriz cimentante envolve a parte frágil, que é a madeira. Seu peso relativamente mais baixo e suas capacidades como isolante termo-acústico (características oriundas, basicamente, dos vazios encontrados nos lumens das células vegetais) tornam este material potencialmente atraente ao uso na Construção Civil, seja para uso em painéis divisórios, placas, enchimentos, telhas, ou mesmo em argamassas.

Contudo, mesmo apresentando potencial de uso, para se obter uma boa interação entre a biomassa vegetal e o aglomerante, é de fundamental importância considerar não só a espécie botânica dos resíduos, sua morfologia, arquitetura, comportamentos físicos e químicos, mas também o tipo de cimento utilizado. Assim, nos últimos anos, pesquisas, produção e utilização de compósitos à base de resíduos de madeira têm sido fomentadas no Brasil, proporcionando avanço notável no desenvolvimento deste novo material, já que o interesse neste compósito não é mais tão restrito ao âmbito científico-acadêmico.

Partindo destas condições de contorno, o presente trabalho atenta para o aproveitamento dos resíduos de madeiras da região Amazônica, apontando os mesmos como insumo para a composição de um material alternativo, baseado na associação desta biomassa vegetal com uma matriz de cimento Portland.

## 1.2 Justificativa da Pesquisa

A atual conjuntura mundial acaba por fazer com que o ser humano viva em constante mudança de paradigmas sócio-político-econômicos, numa tentativa célere de adaptação às constantes mutações do meio ambiente causadas unicamente por suas próprias ações no espaço em que vive. Durante o desenvolvimento das sociedades humanas, praticamente todas as tecnologias desenvolvidas foram baseadas no usufruto dos recursos naturais disponíveis, sem nenhum tipo de preocupação com seu esgotamento.

O reconhecimento da importância de determinados recursos naturais para a sociedade humana aumentou sobremaneira no séc. XIX, através de ações conjuntas para sua conservação (YOUNGS e YOUNGQUIST, 1999). Nesta época, grande parte dos recursos não-renováveis já demonstra seus primeiros sinais de falência, proporcionando grande impulso em todos os setores de produção em busca de novas alternativas que garantam o funcionamento das engrenagens que mantêm a sinergia das diversas sociedades do globo. A manutenção dos recursos renováveis, a seu turno, desponta como uma das alternativas mais seguras para garantir a produção mundial.

Novos paradigmas de produção nasceram deste quadro, e, no seu bojo, ordens sócio-organizacionais diversas que demandam sempre novas alternativas para a produção de seu espaço. Em face disto, novas soluções de cunho tecnológico acabam tornando-se imperativas buscando o desenvolvimento de novos materiais e o aperfeiçoamento de outros já antigos, adequando os mesmos a estas novas funções.

Em vários países esta situação já começou a ser minimizada através de pesquisas direcionadas ao desenvolvimento de materiais alternativos e pelo emprego de novas tecnologias para melhor desempenho dos mesmos. O interesse é crescente na medida em que estes novos insumos apresentam potencial de redução dos custos de produção, por utilizarem materiais relativamente disponíveis, como refugos, resíduos industriais, concorrendo assim para a minimização de efeitos nocivos de impactos ambientais ocasionados pela falta de destinação dos mesmos.



A atual conjuntura brasileira, e mesmo mundial, tornou o reaproveitamento e a reciclagem de resíduos de suma importância tanto para a preservação ambiental quanto para garantir a durabilidade de determinadas matérias primas que servem de suporte à maioria das produções industriais. Neste contexto, a indústria da Construção Civil é bastante pródiga por ser uma das poucas que pode, eventualmente, utilizar resíduos de outros processos industriais em produtos derivados do cimento Portland (ISAÍÁ, 1996).

Como exemplo disto tem – se alguns tipos de cimento com adições minerais, como a cinza volante e escória de alto forno – resíduo com características pozolânicas provenientes da indústria siderúrgica. Os próprios resíduos de construção e demolições também podem ser aproveitados, servindo como insumo para a fabricação de materiais (HAMASSAKI, 1996). Dependendo da quantidade de resíduos gerada e da potencialidade de seu aproveitamento, pode-se criar um ciclo de retro-alimentação da própria indústria da Construção Civil (AGOPYAN e JOHN, 1999; JOHN, 2000).

Dos materiais alternativos potencialmente utilizados pela Construção Civil, a madeira, sob a forma de partículas de granulometria variada (*flakes*), de maravalha (*wood chips*), ou mesmo pó-de-serra, pode ser associada com alguns materiais, dentre eles os aglomerantes minerais, visando à confecção de placas, blocos para piso, enchimentos, argamassas. A estas aplicações potenciais, soma-se a possibilidade de mitigar impactos ambientais causados pela falta de destinação adequada dos resíduos de madeira.

Isto posto, a realização do presente trabalho parte da premissa que os resíduos gerados por marcenarias, serrarias, estâncias madeireiras e correlatas, apresentam relativo potencial de uso na Construção Civil na Região Amazônica. Contudo, a região ainda carece de estudos especificamente direcionados para este fim, uma vez que as pesquisas nacionais realizadas com compósitos cimento-madeira, geralmente utilizam espécies botânicas diferentes daquelas encontradas no Norte do Brasil.

As espécies usualmente empregadas são coníferas de climas subtropicais ou temperados (*pinnus caribea*, *pinnus sp*, *pinnus ellioti*, etc), ou espécies de reflorestamento. Os estudos tornam-se ainda mais restritos quando se considera como insumo para a fabricação do compósito cimento-madeira, resíduos de folhosas com composição variada, como analisado no presente trabalho.

Observa-se, portanto, que as linhas de pesquisa com resíduos de dicotiledôneas, particularmente as da Região Amazônica, ainda não apresentam a mesma expressividade numérica daquelas desenvolvidas com coníferas. A maior justificativa para tal restrição reside na dificuldade de compatibilização da biomassa de folhosas com determinados materiais em função da quantidade e tipo de extrativos. Contudo, é possível mitigar os efeitos deletérios adotando alguns tratamentos químicos ou físicos. Assim, sob as condições em quadro, são apresentados os objetivos do presente estudo, como seguem.

### **1.3 Objetivos**

Relativo aos objetivos da presente pesquisa, os mesmos são divididos em dois, quais sejam:

#### **1.3.1 Objetivo Geral**

- Comparar a influência de três tratamentos físicos (secagem em estufa, banho térmico e mineralização) aplicados em resíduos de madeira, através do desempenho mecânico de argamassas cimento-madeira após ensaios de resistência à compressão.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Apontar os resíduos de dicotiledôneas produzidos em serrarias e marcenarias existentes na Zona Metropolitana de Belém como um material alternativo potencialmente viável para o emprego no meio técnico, e passível de ser utilizado pela indústria da Construção Civil da Cidade de Belém;
- Atentar para a possível redução dos impactos ambientais ocasionados pela falta de destinação dos resíduos de madeira em função de sua potencial utilização como insumo para produção de argamassas compósitas;
- Contribuir para o desenvolvimento de estudos visando a redução de consumo do agregado miúdo na Construção Civil através da adição dos resíduos de madeira como substituição parcial do agregado.

## 1.4 Limitações da pesquisa

O universo de pesquisa a ser trilhado por estudos voltados à produção do compósito cimento-madeira utilizando espécies vegetais da região Amazônica é muito vasto em função da escassez de trabalhos realizados. Decorrente da magnitude deste universo foi necessário limitar, circunscrever o âmbito da presente pesquisa de forma tal a proporcionar maior concisão e objetividade, seja no desenvolver do programa experimental, interpretações de dados, ou conclusões.

Inicialmente, o presente trabalho visa verificar a viabilidade tecnológica do compósito cimento-madeira com resíduos de serraria, não contemplando, por conseguinte, aportes econômicos, mesmo considerando que os custos relativos à produção e tratamentos adotados também sejam variáveis significantes.

Outra limitação é a impossibilidade de utilização de resíduo de serrarias e indústrias de beneficiamento/desdobramento e transformação de madeira segundo uma única espécie botânica definida. A coleta *in natura* do resíduo de madeira sem seleção botânica deu-se principalmente em função da impossibilidade do mesmo ser encontrado, nos pátios, separados por espécies, posto que os mesmos são depositados em grandes montes, dificultando sobremaneira a sua classificação. Além disto, os resíduos mudam de uma serraria para outra conforme as espécies utilizadas, impossibilitando encontrar resíduos de espécies idênticas e com idênticas concentrações de maravalha e pó-de-serra em caso de necessidade de reprodução do programa experimental.

A pesquisa também encontra limitação referente ao aglomerante empregado no programa experimental. A tipologia de cimento poderia ter sido considerada como mais uma variável relevante no comportamento dos compósitos cimento-madeira, de forma que, a influência de cimentos de alta resistência inicial, ou de cimentos de baixa alcalinidade também poderiam ter sido avaliadas. O critério de avaliação de desempenho, a seu turno, foi circunscrito à resistência à compressão não somente por esta ser a característica mecânica mais referenciada em pesquisas correlatas, mas também pela insuficiência de recursos financeiros e tecnológicos disponíveis – até a data da conclusão da presente pesquisa - nos laboratórios de Engenharia Civil da UFPa e UNAMA, onde o programa experimental foi desenvolvido.

## 1.5 Estrutura da pesquisa

A presente dissertação é composta dos seguintes capítulos, quais sejam:

- 1-Introdução: capítulo referente à introdução ao trabalho desenvolvido, justificativas, objetivos e limitações da pesquisa;
- 2-Revisão da Literatura: referente à revisão da literatura técnica, enfocando o compósito cimento-madeira e algumas pesquisas já realizadas, além de uma abordagem sobre o comportamento dos materiais constituintes do compósito a fim de trazer à lume o comportamento isolado de cada material, assim como o comportamento do dos mesmos após a associação para a fabricação do compósito;
- 3-Programa Experimental: referente à metodologia adotada para o desenvolvimento do trabalho, onde estão inclusas as caracterizações do material utilizado para a fabricação do compósito, a definição dos tratamentos adotados para os resíduos de madeira, a definição dos traços das argamassas compósitas, os ensaios preliminares e, por fim, a moldagem e produção dos CPCs;
- 4-Resultados e discussões: no capítulo em questão serão apresentados os resultados obtidos com o programa experimental e discussões acerca dos mesmos, relacionando os resultados obtidos a pontos específicos da literatura técnica consultada;
- 5 – Conclusões e sugestões para pesquisas futuras: neste capítulo são apresentadas as conclusões da pesquisa, baseadas nos resultados obtidos, além de proposições para trabalhos que possam, futuramente, trazer à lume outros elementos da tecnologia dos compósitos cimento-madeira;
- 6 – Referências Bibliográficas: são apresentadas as referências consultadas e utilizadas no presente trabalho, dentre elas, artigos científicos, livros, compêndios e Normas.

Ao final, são apresentados os Anexos, onde constam as tabelas, quadros, planilhas e correlatos que não foram incorporados ao corpo do texto do trabalho.

## **2 Revisão da Literatura**

No presente capítulo são trazidos à lume os conceitos sobre materiais compósitos, com ênfase naqueles desenvolvidos com materiais vegetais. Para que suas condições gerais sejam perfeitamente esclarecidas, são inicialmente apresentados alguns conceitos básicos sobre a natureza dos materiais compósitos, bem como sua classificação e algumas variáveis de maior relevância que influenciam sobremaneira o seu desempenho.

O comportamento dos materiais constituintes, como o cimento, a madeira e o aditivo acelerador, também são revistos, assim como sua influência no comportamento geral do material em questão.

### **2.1 Materiais Compósitos**

Os compósitos de uma forma geral formam uma classe importante no âmbito dos materiais de engenharia, tanto que sua produção mundial é da ordem de milhões de toneladas anuais, com crescimento em torno de 5 a 10% a cada ano (HULL e CLYNE, 1996). Este quadro mostra que os materiais compósitos já apresentam grande penetração no mercado mundial, o que fomenta a sua crescente produção. Tais materiais começaram a ser usados em larga escala a partir da primeira metade do século XX e atualmente é possível observar o emprego de algumas tipologias de compósito nas indústrias naval, aeroespacial, automobilística e eletrônica (HAGE JÚNIOR, 1990).

Os materiais ditos compósitos podem ser definidos como materiais formados de dois ou mais constituintes com distintas composições, formas, estruturas, características e propriedades, e que se encontram separados por uma interface. Em muitos casos, os compósitos apresentam-se como associação de um material resistente e rígido, de geometria

alongada, imerso em um material de menor densidade, formando assim uma matriz, porém, para viabilizar tal associação, os materiais devem ser, essencialmente, insolúveis um no outro (HULL e CLYNE, 1996).

O intuito principal da fabricação de um material compósito é tirar proveito de uma associação positiva entre diferentes materiais para a produção de uma única peça, um único corpo, que apresente propriedades e características que suplantem às dos componentes unitários, ou então, para aumentar a força, dureza, resistência, tenacidade e outras propriedades físicas de determinados materiais. Em verdade, um dos maiores atrativos para a produção dos compósitos é que normalmente exibem qualidade superior à de seus constituintes unitários e, freqüentemente, algumas outras características que nenhum constituinte possui (SOUZA, 2003).

Com efeito, parcela considerável dos compósitos é produzida partindo destas premissas, contudo, em alguns casos, como nos compósitos cimento-madeira, a associação é particularmente nociva, pois o meio alcalino da matriz cimentante degrada o material lignocelulósico da madeira, que por sua vez, libera “extrativos” na matriz, retardando sua pega e endurecimento. Mesmo contando com tais efeitos, passíveis de serem mitigados, o compósito cimento-madeira apresenta dentre suas vantagens, um aumento de tenacidade e ductilidade à matriz de cimento.

## **2.2 Usos e Aplicações dos Compósitos**

Atualmente, os materiais compósitos apresentam variadas formas de uso e aplicações, principalmente devido à possibilidade de trabalhar seus materiais componentes, antes da associação, para obter uma microestrutura desejada ou mais perfeitamente adequada para condições específicas de solicitação. É através desta forma de combinação entre materiais às vezes reputados como insociáveis, que modernos dispositivos e sistemas são fabricados por variadas indústrias com os mais diversos objetivos e funções, como compósitos com finalidades ópticas, eletro-eletrônicas, químicas e estruturais.

Atualmente, a Indústria da Construção Civil é bastante pródiga no uso desta tipologia de material em função de apresentar potencialidades de uso para os materiais compósitos, dentre elas, aplicação em estruturas, como as de concreto reforçado com fibras para aumento

da tenacidade, em revestimentos e divisórias com finalidade de isolamento termo-acústico, principalmente compósitos que apresentem baixa densidade e resistência mecânica considerável; e até mesmo em trabalhos de intervenções restaurativas, principalmente por alguns compósitos serem potencialmente inertes, não ocorrendo incompatibilidades com rebocos e alvenarias antigas, além da vantagem de que tais materiais podem ser moldados conforme necessidades estético-formais específicas.

## **2.3 Natureza dos Compósitos**

Observa-se, por conseguinte, que a Indústria da Construção Civil é uma potencial consumidora dos materiais compósitos, que são incorporados em novos processos construtivos que já prevêm a utilização desta modalidade de material, ou então, são associados a materiais comumente utilizados, como o gesso e o cimento Portland, para incremento de determinadas características físicas, dentre elas, a ductilidade e a tenacidade. Não obstante, é necessária a observância que a empregabilidade dos materiais compósitos na construção é estreitamente relacionada com a natureza do compósito, seja ele artificial ou natural.

### **2.3.1 Compósitos Naturais**

Os compósitos e seus conceitos sempre existiram na natureza, onde vários materiais são efetivamente compósitos naturais; isto é uma verdade particular dos materiais orgânicos, que quase sempre são formados de, pelo menos dois constituintes. Como exemplo, tem-se a madeira. Compósito por natureza, a madeira apresenta complexa estrutura interna, onde uma matriz de fibras de celulose encontra-se imersa em um adesivo natural, chamado lignina. Esta estrutura interna foi maturada por milhões de anos de evolução para que suas propriedades mecânicas fossem voltadas para o melhor desempenho do material (SOUZA, 2003).

### **2.3.2 Compósitos Artificiais**

Os compósitos artificiais foram desenvolvidos pelo homem através dos exemplos da própria natureza. Diversos materiais criados modificaram muitas de suas características com a introdução dos conceitos dos compósitos nos mais variados ramos da ciência; de outra sorte, grande número de materiais já foram desenvolvidos sob a égide – nem sempre permissiva –

da associação de dois ou mais materiais para a obtenção de um novo que suplante as características dos materiais constituintes.

Como a produção mundial de materiais compósitos é ampla, várias classificações foram elaboradas para melhor de abarcar suas mais diversas tipologias. Uma destas classificações define os materiais compósitos segundo a morfologia de seus agentes de reforço, sejam eles: compósitos particulados, compósitos com fibras e compósitos com laminados (SOUZA, 2003).

Em considerando os materiais compósitos e sua formulação para uma particular finalidade, é importante partir da premissa que cada um dos seus constituintes apresenta propriedades físicas, químicas e mecânicas que lhe são intrínsecas. Dentre as principais propriedades que devem ser levadas em consideração figuram a rigidez, resistência e tenacidade. A densidade é uma propriedade de relativa importância, a não ser nos casos em que a massa de um dos componentes é fundamental para o desempenho do compósito.

Existem variados tipos de compósitos industrializados, baseados principalmente em matrizes poliméricas termoestáveis ou termoplásticas. Estas, em geral, apresentam-se reforçadas com fibras alinhadas, a exemplo, as de vidro e as de carbono (HULL e CLYNE, 1996). Atualmente, há um crescente interesse em compósitos produzidos com matrizes metálicas, como as de alumínio e titânio, sendo estas reforçadas com fibras cerâmicas. Fibras orgânicas também são comumente associadas a termoplásticos de baixo ponto de fusão; estas associações representam baixo custo de produção, além de um atrativo material de reforço que potencializa propriedades mecânicas como rigidez, resistência e deflexão por calor (CLEMONS *et al*, 1999).

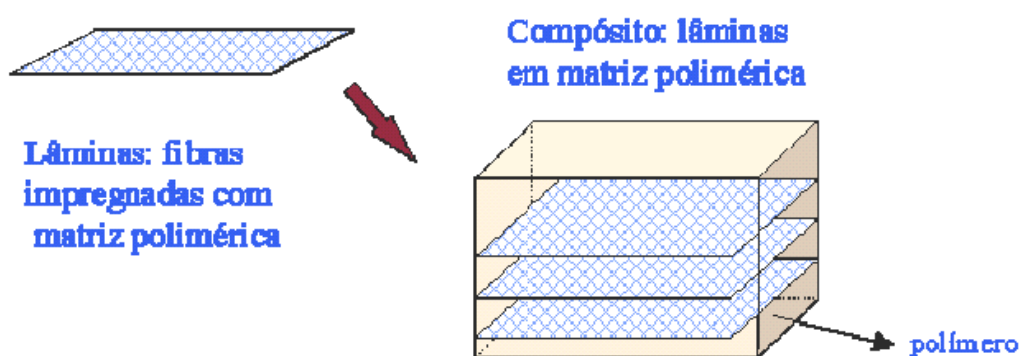
Nestes casos, a intenção do reforço é o aumento da tenacidade das matrizes minerais pela adição de outro constituinte, desde que características como rigidez e resistência não sejam particularmente comprometidas. Estes materiais já apresentam um grande avanço tecnológico, porem, ainda necessitam de pesquisas que possam mitigar alguns problemas particulares oriundos de seu processo de fabricação (HULL e CLYNE, 1996). Um exemplo bem sucedido desta associação é a utilização do pó-de-serra (*wood flour*) como filler de reforço em chapas termoplásticas extrudadas para a fabricação de painéis internos de automóveis (KRZYSIK *et al*, 2000).



Os compósitos polímeros-metais, atualmente, têm merecido uma atenção especial da comunidade técnico-acadêmica. Tais materiais apresentam variadas possibilidades de aplicação, porém suas condições de uso não deverão ultrapassar temperaturas que excedam os limites entre 100°C e 200° C. Em geral, os compósitos polímeros - metais são utilizados por apresentarem peso menor, relativa facilidade de moldagem, principalmente no tocante a formas mais complexas, além da boa resistência à corrosão e custos de produção relativamente moderados (SOUZA, 2003).

Os compósitos cerâmicos, a seu turno, formam uma tipologia bastante específica de materiais compósitos desenvolvidos a partir da necessidade da obtenção de materiais refratários. Tais materiais têm sido bastante empregados no âmbito da siderurgia, porém, para tanto, algumas inclusões metálicas são feitas nas matrizes cerâmicas com a finalidade precípua de que o material refratário possa ser suscetível ao campo eletromagnético gerado em fornos de indução de usinas siderúrgicas. Tal procedimento permite o auto-aquecimento deste material, reduzindo, por conseguinte, as desvantagens do uso de cadinhos de grafite na fusão de ligas reativas mais suscetíveis à dissolução de carbono.

Outro tipo de material compósito é produzido com adições do tipo fibras, que se situam em camadas ou lâminas que são sobrepostas para a conformação de estruturas maiores, chamadas laminados. Os compósitos ditos laminados apresentam várias aplicações, e para cada uma delas existe uma melhor orientação das fibras nas lâminas, assim como seqüência de superposição das lâminas mais adequadas, de forma tal que, em alguns casos, as lâminas não se superpõem com a mesma orientação para a fabricação dos laminados. A figura 01 ilustra a produção de um compósito laminado.

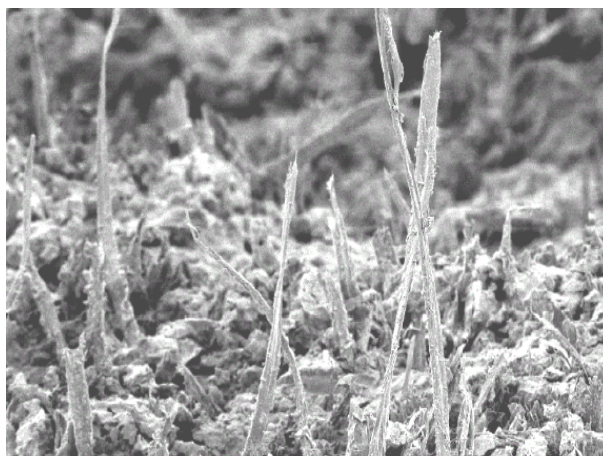


**Figura 01** – Exemplo de associação de fibras em matriz polimérica para fabricação de compósito laminado

(Fonte: SOUZA, 2003).

Os compósitos reforçados com fibras podem ser produzidos com o aproveitamento de uma série de tipologias de fibras artificiais, como metálicas (aço), poliméricas (plásticos), fibras de vidro, fibras de carbono, dentre outras. Todavia, as fibras naturais também são utilizadas como material de reforço. Estas, a seu turno, apresentam subdivisão quanto à sua natureza, ou seja, fibras naturais de origem mineral, como as de amianto, e fibras naturais de origem orgânica, como as fibras de juta, sisal, malva, coco, curauá, etc.

As fibras de origem orgânica atualmente têm sido alvo de pesquisas no âmbito técnico-acadêmico nacional, como as desenvolvidas por BERALDO (1996), AGOPYAN (1996), SAVASTANO (2000), LATORRACA (2000), dentre vários, principalmente quando utilizadas em associação com matrizes como as poliméricas, e matrizes minerais, como as de gesso e as de cimento Portland. A figura 02 ilustra a associação de fibras (corpos finos e alongados) de origem vegetal com uma matriz de cimento Portland.



**Figura 02** – MEV. Imagens de elétrons secundários de matriz de cimento Portland reforçada com polpa de *Pinus Radiata* (Fonte : SAVASTANO, 2000).

## 2.4 Associação de Matrizes e Fibras

As matrizes dos materiais compósitos podem ser baseadas em polímeros, metais ou materiais cerâmicos, como o cimento, e, sua escolha está intimamente relacionada com as propriedades desejadas, o uso final e o método de produção do compósito. As propriedades e o desempenho das matrizes dependem da sua microestrutura, que por sua vez, dependem da forma de produção do compósito e das subseqüentes retrações térmicas e mecânicas. Alguns reforços são fabricados especificamente para uma matriz particular, o que não acontece com os reforços naturais, porém, independente da natureza do reforço, pode-se atingir uma boa

interação entre a fibra e a matriz, através de um detido exame nas propriedades físicas de cada um dos elementos constituintes do compósito.

No âmbito das fibras naturais, existe um largo espectro de fibras orgânicas que podem ser usadas como reforço, onde a mais comum é a fibra celulósica, obtida principalmente da madeira, que é um compósito natural essencialmente formado por fibras cristalinas de celulose em uma matriz amorfa, ou parcialmente cristalina, de lignina e hemicelulose. As fibras de celulose – ou microfibrilas – podem ser extraídas de um grande numero de espécies botânicas. Estudos desenvolvidos com fibras de diversas naturezas demonstraram que algumas propriedades das fibras de celulose não apresentam grandes desvantagens se comparadas as de outras fibras artificiais, principalmente se a densidade for fator de grande importância (HULL e CLYNE, 1996).

## **2. 5 Materiais orgânicos como reforços em matrizes de cimento Portland**

As primeiras pesquisas com materiais lignocelulósicos associados a aglomerantes minerais, como o cimento Portland, aconteceram por volta da década de 20 na Europa e Austrália, onde em 1914 acontece um dos primeiros usos de injeção de gás a fim de melhorar a fabricação de painéis e placas a base de aglomerantes inorgânicos e madeira (LEÃO *et al*, 1994). A este material foi dado o termo genérico compósito cimento-madeira, e, a partir da década de 60, grupos de pesquisas dedicaram mais atenção ao estudo dos compósitos, como na Alemanha, onde estudos isolados foram realizados a fim de obter resultados de maior precisão na caracterização deste novo material (CAMPOS *et al*, 2000).

O compósito cimento-madeira é confeccionado através de misturas dosadas de cimento Portland, água e fibras orgânicas de variadas ordens e dimensões, como a fibra do coco, de sisal, de juta, de curauá, ou mesmo fibras de madeira, estas últimas na forma de pó-de-serra e/ou maravalhas, que são partículas maiores, também conhecidas como serragem (CAMPOS *et al*, 2000). Os compósitos cimento-madeira são classificados em dois grandes grupos, quais sejam: cimento-partículas de madeira e cimento-fibras de madeira; o primeiro é usado como matéria prima para fabricação de painéis acústicos e resistentes ao fogo; o segundo, foi inicialmente desenvolvido com intuito de substituir as fibras de asbestos como material de reforço de matrizes de cimento (WOLFE e GJINOLLI, 1997).

Com efeito, a biomassa vegetal tem sido utilizada, mesmo sob forma de subproduto de outras atividades econômico-industriais, para a fabricação de materiais construtivos alternativos, e potencialmente baratos, apresentando possibilidade de emprego em sua própria região de origem. Todavia, os principais argumentos contra a associação de biomassa vegetal-cimento justificam-se pelos efeitos deletérios observados, como a difícil compatibilidade química entre algumas espécies botânicas e o aglomerante, ocasionando redução em sua resistência mecânica do compósito, aumento no tempo de pega, fragilização das fibras devido o meio alcalino do cimento, dentre outros. A figura 03 ilustra a incompatibilidade química gerada pela associação da fibra de bambu quando associada ao cimento Portland.



**Figura 03** – Incompatibilidade entre a fibra do bambu e a matriz de cimento Portland (Fonte: Disponível em: <[www.biokreto.com.br](http://www.biokreto.com.br)> Acesso em 21/11/2001).

A despeito dos argumentos, o potencial de uso do compósito cimento-madeira é amplo, pois apresenta um comportamento satisfatório conquanto seu desempenho mecânico, pois atua de forma excelente em relação à absorção de energia no estado pós-fissurado, além de apresentar um sensível aumento no comportamento de resistência à tração e cargas de impacto e percussão (MEYERS, 1994). As consideráveis propriedades termo-acústicas apresentadas pelo compósito devido à presença de corpos cavernosos da estrutura celular das fibras vegetais também o tornam bastante atraente para a utilização na Indústria da Construção Civil. Somado às retromencionadas vantagens, o peso do material, quando em forma de argamassa, é comparativamente mais leve do que as argamassas convencionais de cimento-agregado miúdo (BOUGUERRA *et al*, 1998).

De fato, as matrizes cimentícias reforçadas com madeiras e com fibras têm apresentado cada vez mais possibilidades de utilização na Construção Civil, principalmente pela grande modificação na dinâmica das fraturas, que de frágeis passam a apresentar um sensível aumento no nível de ductilidade em função do reforço com a fibra (SAVASTANO *et al*, 1994). Tais fibras, em geral, são de pequenas dimensões, e orientam-se de forma aleatória nas matrizes (a não ser por força de algum agente externo que as oriente em apenas um sentido), resistem a determinados esforços estáticos e dinâmicos, e, podem atuar em certas direções e regiões específicas de peças estruturais, placas, painéis, chapas, etc. As partículas (*flakes*) de maiores dimensões, a seu turno, contribuem de forma sensível no que tange o aumento de resistência à compressão.

## **2.6 Principais fatores que influenciam a produção do compósito cimento-madeira**

Escolher a composição e a estrutura de um compósito não é tarefa fácil, principalmente naquelas situações em que o mesmo é reforçado com matéria orgânica. É necessário observar que a introdução de um reforço em uma matriz modifica a grande maioria de suas propriedades, além disto, podem ocorrer mudanças em sua microestrutura em função da presença do reforço. No caso específico do compósito cimento-madeira, para que ocorra uma interação satisfatória entre os materiais constituintes e o bom desempenho do compósito, é necessário considerar os intervenientes na produção deste tipo de material, como as características intrínsecas à matriz e à fibra de reforço, a geração de tensões residuais resultantes de contrações térmicas diferenciais durante a fabricação, dentre outras. A seguir, alguns elementos intervenientes na produção de compósitos cimento-madeira.

### **2.6.1 Matrizes**

Relativo às matrizes, alguns dados como densidade, módulo de elasticidade, resistência à compressão e à tração, expansão e condutividade térmica são de relevante importância para uma associação bem sucedida entre dois ou mais materiais para a fabricação de um compósito. Tais propriedades podem determinar o potencial de um compósito em função dos níveis de compatibilidade da matriz com os materiais de reforço. Um outro dado, prático, é relativo à facilidade da fabricação do compósito, pois que algumas matrizes não apresentam fluidez satisfatória que permita a moldagem de artefatos e componentes com o material após a adição das fibras de reforço.

Atualmente, os reforços de matrizes à base de cimento Portland são efetuados pela adição de fibras curtas, de tal forma que a moldagem não se torne particularmente difícil; a maior vantagem do reforço com esta tipologia de fibras é o aumento da tenacidade, pois a pasta de cimento apresenta características de maior fragilidade quando submetida à determinadas tensões, e, mesmo um pequeno acréscimo na tenacidade pode ser muito vantajoso. Para compreender a real dimensão das propriedades e comportamentos do cimento Portland quando empregado como matriz do compósito cimento-madeira é lícito trazer à lume algumas considerações em particular desta tipologia de “matriz”.

### **2.6.1.1 Cimento Portland**

O cimento é um material aglomerante por definição, e dentre os aglomerantes, é classificado como hidráulico, ou seja, não só enrijece e endurece com a presença da água como também forma um produto resistente a ela (CZERNIN, s/d). Apresenta-se pulverulento e de coloração acinzentada, obtido pela moagem de um clínquer (nódulos de 5 a 25 mm de diâmetro de material sinterizado à base de calcáreo e argila e aquecido à alta temperatura) composto basicamente de silicatos de cálcio. O clínquer é uma mistura heterogênea de diversos minerais, onde mesmo seus grãos apresentam-se heterogêneos, devido à presença variável dos diferentes constituintes em uma só partícula (BOGUE, 1952).

Ao entrar em contato com a água, o clínquer torna-se pastoso, e, dentro de um intervalo de tempo, denominado tempo em aberto, enrijece, perdendo plasticidade, e em seguida, endurece, ganhando resistência mecânica. Ao fenômeno de enrijecimento e endurecimento dá-se a denominação de reação de hidratação, e a mesma, por ser uma reação exotérmica, é acompanhada de liberação de calor (BLANKS e KENNEDY, 1955).

### **2.6.1.2 Composição básica do clínquer e tipos de cimento**

O conhecimento da composição básica do cimento Portland é um dentre os vários elementos que podem trazer à lume a sinergia das interações entre esta tipologia de matriz e seu reforço com fibras, e conseqüentemente, uma melhor compreensão do comportamento do compósito cimento-madeira. O clínquer do cimento tem os silicatos de cálcio como principais materiais constituintes, portanto, as matérias – primas usadas na produção do cimento devem suprir cálcio e silício em quantidades necessárias. Alumina, óxidos de ferro, óxidos de

magnésio e álcalis também entram na composição do clínquer. Estes minerais são encontrados nas argilas e têm efeito mineralizante na formação dos silicatos de cálcio a baixas temperaturas durante o processo de fabricação (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

O resultado destas adições é que o clínquer de cimento, além dos silicatos de cálcio, contém também aluminatos e ferroaluminatos de cálcio. Basicamente, o cimento engloba 4 fases distintas, quais sejam: silicato tricálcico ( $C_3S$ ), silicato bicálcico ( $C_2S$ ), aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) e outra fase aproximada à composição conhecida como ferroaluminato tetracálcico ( $C_4AF$ ) (RAMACHANDRAN, 1969). As três primeiras fases formam uma matriz cristalina de  $C_3A$ , onde estão mergulhados pequenos cristais de “alita” e “belita” –  $C_3S$  e  $C_2S$ , respectivamente. A última fase, ferroaluminato tetracálcico, ou simplesmente ferrita, compreende uma solução sólida de cálcio, alumina e óxido de ferro, havendo variações em sua composição (TAYLOR, 1964).

Além destes minerais básicos que compõem o clínquer, outras adições – basicamente materiais pozolânicos, escórias e materiais carbonáticos – podem ser feitas com a finalidade de melhorar o desempenho ou para a fabricação de diversos tipos de cimento. (TAYLOR, 1964).

O conhecimento dos elementos básicos constituintes do clínquer revela parâmetros de extrema importância no que tange o comportamento do cimento, pois cada um dos seus constituintes apresenta uma determinada propriedade tecnológica, seja ela de alto calor de hidratação, endurecimento rápido, enrijecimento rápido, baixa ou alta resistência inicial, dentre outras; estas são características que, sendo conhecidas, podem ser particularmente aproveitadas no sentido de melhorar a compatibilidade entre o cimento e a biomassa vegetal para a fabricação de compósitos cimento-madeira.. Os principais componentes minerais do clínquer, e suas respectivas percentagens são observados na tabela 01.

NOME	FÓRMULA	ABREVIATURA	% NO CLINQUER	PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS
Silicato tricálcico (Alita)	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$	25 – 60	Endurecimento rápido Alto calor de hidratação Alta resistência inicial
Silicato bicálcico (Belita)	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$	15 – 20	Endurecimento lento Baixo calor de hidratação Pega muito rápida
Aluminato tricálcico (Aluminato)	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$	4 – 12	Alto calor de hidratação Alta retração Contribui para resistência inicial
Ferro aluminato Tetracálcico (Ferrita)	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$	8 – 12	Endurecimento lento Não contribui para resistência Cor escura
Cal livre	$\text{CaO}$	$\text{C}$	5 – 8	Aceitável em pequenas quantidades. Maiores quantidades causam aumento de volume e fissura

**Tabela 01** – Principais componentes do clínquer, seus percentuais e suas propriedades (fonte: BATTAGIN & ESPER, 1988 *apud* LATORRACA 2000)

### 2.6.1.3 Mecanismos de hidratação do cimento

Entender as transformações químicas envolvidas durante o processo de hidratação do cimento é de fundamental importância para o desenvolvimento de tecnologias baseadas neste tipo de aglomerante, principalmente aquelas voltadas à produção de argamassas, de concretos e seus derivados, sejam eles compósitos ou não. No caso dos compósitos cimento-madeira, os efeitos deletérios da associação são refletidos tanto nas fibras de reforço, que sofrem decomposição química da lignina e hemicelulose pela agressividade do meio, quanto na matriz de cimento, que apresenta sensíveis alterações em seu processo de hidratação (AGOPYAN e SAVASTANO, 1998). Os efeitos nocivos das alterações na hidratação do cimento provocado pela presença de partículas vegetais são, basicamente, redução do calor de hidratação, maior tempo de pega e depreciação na resistência mecânica.

Isto posto, necessário é, para compreender a forma com a qual as partículas de madeira alteram as características da matriz, apreender o mecanismo de hidratação do cimento Portland, que consiste basicamente na ocorrência de reações simultâneas de todos os compostos anidros do cimento com a água, porém, todos estes compostos não hidratam sob mesma velocidade; trabalhos desenvolvidos (BOGUE, 1952, MEHTA e MONTEIRO, 1994;



NEVILLE, 1997), indicam algumas proposições para o mecanismo de hidratação do cimento Portland; dentre elas, figuram duas principais, quais sejam: por dissolução e precipitação e por mecanismo topoquímico.

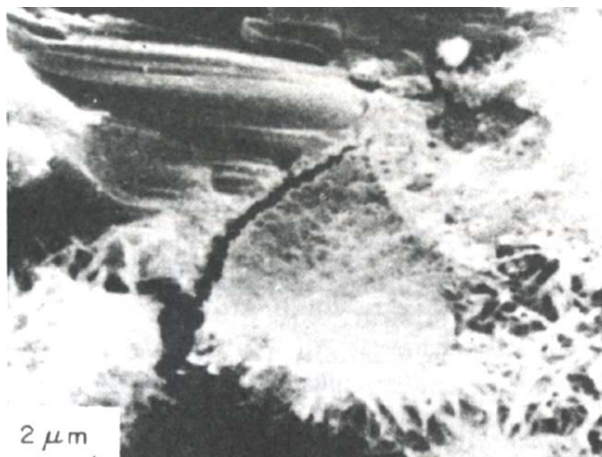
No mecanismo de dissolução – precipitação, os compostos anidros são diluídos pela água em seus compostos iônicos, e ocorre a formação de hidratos na solução que, devido à sua solubilidade baixa, precipitam da solução supersaturada. No mecanismo topoquímico ou de hidratação no estado sólido, as reações acontecem na superfície dos compostos anidros do cimento, sem que eles entrem em solução (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Há indícios de que o processo de hidratação das matrizes cimentantes, em seus estágios iniciais, ocorre segundo o mecanismo de dissolução – precipitação, e em fases mais avançadas, o mecanismo topoquímico é predominante, uma vez que a mobilidade iônica da solução se torna menor (NEVILLE, 1997). Como o processo de hidratação é exotérmico, o mesmo é acompanhado liberação de calor, e, esta quantidade de calor depende diretamente de fatores como o tipo do cimento, da sua finura, da temperatura, do tempo de hidratação, etc (BATTAGIN e ESPER *apud* LATORRACA, 2000).

Os aluminatos encontrados no clínquer apresentam taxa de hidratação maior que a dos silicatos, que reflete diretamente no comportamento inicial de perda de plasticidade (enrijecimento) nas pastas de cimento Portland e no calor de hidratação. Geralmente, parcela considerável do calor de hidratação é atribuída ao  $C_3A$ , uma vez que sua reação com a água é imediata, formando rapidamente hidratos cristalinos, onde o primeiro hidrato a cristalizar-se durante as primeiras horas de hidratação é denominado alto – sulfato, ou pela designação mineralógica, etringita. A etringita cristaliza-se em forma de pequenas agulhas prismáticas que contribuem para o enrijecimento, pega e ganho de resistência inicial (MEHTA & MONTEIRO, 1994). A figura 04 ilustra a formação das primeiras agulhas de etringita em matriz de cimento Portland.

Após o sulfato na solução da pasta de cimento ter sido consumido, os cristais de etringita tornam-se instáveis e é paulatinamente convertido em monossulfato, também denominado baixo sulfato, que são os produtos finais de hidratação do cimento. Em verdade, os principais compostos de hidratação são silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), que proporcionam resistência à estrutura, e o hidróxido de cálcio, ou Portlandita ( $Ca(OH)_2$ ), que

confere o caráter alcalino às pastas de cimento e promovem a degradação de fibras orgânicas quando estas são associadas à uma matriz cimentante.



**Figura 04** - Microscopia eletrônica de varredura (MEV) de amostra fraturada de pasta de cimento Portland com 3 dias de idade – formação das primeiras agulhas de etringita (fonte: METHA & MONTEIRO, 1994).

A reação de hidratação dos silicatos é particularmente complexa, possivelmente devido a seus radicais iônicos, ou seu caráter de maior eletropositividade, que permite um grande número de arranjos atômicos com o oxigênio. Durante a hidratação, são produzidos hidratos bastante similares, porém com diferentes quantidades de hidróxido de cálcio. Tais hidratos de silicato de cálcio têm condições bastante específicas para a formação de estruturas cristalinas, além de apresentarem fases cujas composições são pouco cristalinas ou até mesmo indefinidas. (TAYLOR, 1964).

O silicato de cálcio hidratado, também denominado de gel de tobermorita, é o principal elemento cimentício das pastas endurecidas de cimento Portland, além de ser de fundamental importância no comportamento reológico de pastas frescas, de suas propriedades determinam a consistência e a trabalhabilidade do concreto fresco, além do tempo de pega e endurecimento das matrizes de cimento. Por estas razões, o gel de tobermorita, é, possivelmente, o material componente do cimento com maior importância (BOGUE, 1952). A figura 05 ilustra a morfologia do silicato de cálcio hidratado, ou gel de tobermorita.



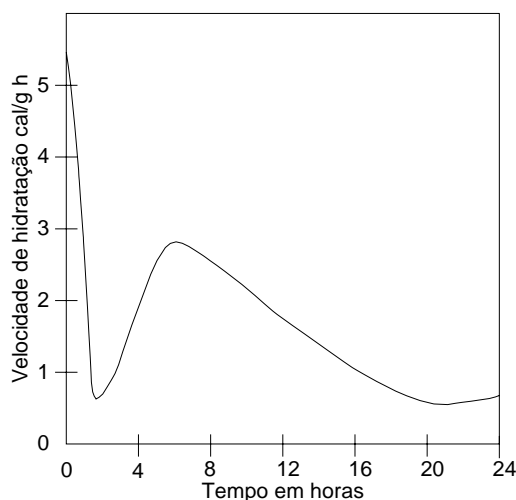
**Figura 05** - Microscopia eletrônica de varredura (mev) de amostra fraturada de pasta de cimento Portland com 3 dias de idade – formação dos cristais de C – S – H, pouco cristalinos e de morfologia fibrosa (fonte: METHA & MONTEIRO, 1994)

#### 2.6.1.4 Calor de Hidratação

O cimento Portland, pela sua finura, apresenta uma grande reatividade; durante a hidratação do cimento, certa quantidade de energia é liberada em forma de calor, caracterizando a hidratação das pastas de cimento como uma reação exotérmica, chegando, em alguns casos a liberar energia de até 500J/g de cimento. Em condições normais de construção, com concreto em baixas quantidades, o calor de hidratação se dissipa por radiação, e as mudanças onde temperatura na estrutura é pequena, e de poucas conseqüências, porém, nas estruturas de maior massa, a baixa condutividade térmica do concreto impede a rápida dissipação do calor liberado, fazendo a massa alcançar, facilmente, temperaturas bastante elevadas (TAYLOR, 1964).

A rigor, o calor de hidratação, como é determinado, é o calor químico advindo das reações de hidratação dos diversos compostos anidros do cimento e do calor da adsorção de água na superfície do gel formado pelo processo de hidratação, correspondendo este último calor à aproximadamente um quarto do total do calor de hidratação (BOGUE, 1954). Na verdade, observa-se que o calor de hidratação representa uma quantidade composta e que a quantidade de calor liberado pelas pastas de cimento está intimamente relacionada com o processo de hidratação.

O nível de reatividade de uma determinada pasta de cimento pode ser avaliada segundo a liberação do calor de hidratação, que na tecnologia do concreto e demais materiais à base de cimento, apresenta vários significados, podendo ser um auxílio na concretagem em temperaturas baixas ou um empecilho em obras cujo volume de concreto seja grande (MEHTA & MONTEIRO, 1994). O gráfico característico da evolução do calor de hidratação ao longo do tempo pode ser visto na figura 06. Nele, observa-se que há uma imediata liberação de calor nos primeiros instantes da hidratação, que provavelmente corresponde à reação exotérmica de hidratação dos aluminatos (NEVILLE, 1997).

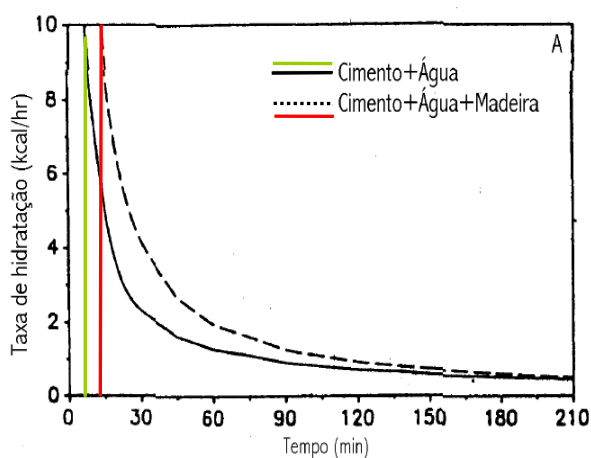


**Figura 06** - Gráfico característico de taxa de liberação de calor durante a hidratação de uma pasta de cimento Portland (fonte: MEHTA & MONTEIRO, 1994).

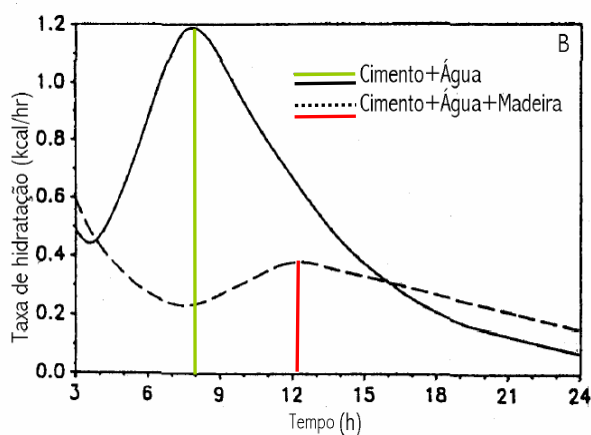
O calor inicial decresce à medida que a presença dos aluminatos é reduzida pelos sulfatos na solução (MEHTA & MONTEIRO, 1994). O segundo pico observado no gráfico de evolução do calor de hidratação, entre quatro e oito horas, representa o calor liberado pela formação das agulhas de etringita.

O gráfico informa ainda sobre o comportamento de enrijecimento e endurecimento da pasta. O início do segundo pico de liberação de calor corresponde ao início da pega, ou seja, o começo do enrijecimento, que culmina com o ponto de inflexão do segundo pico de calor, correspondente à formação das agulhas de etringita. É a partir do segundo pico, que o comportamento da pasta de cimento muda, com o final do enrijecimento (final da pega) e início do endurecimento, e o calor de hidratação apresenta tendência de decréscimo (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

O gráfico característico da taxa de liberação de calor de hidratação muda sensivelmente quando fibras ou partículas orgânicas são adicionadas à pasta de cimento, afetando sobremaneira a magnitude da reação de hidratação, o tempo para as fases e as resistências finais do compósito. A mudança na curva característica de hidratação do compósito cimento-madeira é um indicativo em potencial de uma maior ou menor compatibilidade entre a matriz mineral e a biomassa vegetal. Através das figuras 07 e 08 podem ser observadas as curvas características da hidratação do cimento e do compósito cimento-madeira durante as primeiras 24 horas de hidratação.



**Figura 07** –Taxa de hidratação do cimento e do cimento-madeira durante as primeiras horas de hidratação (Fonte : HACMI e CAMPBELL *apud* LATORRACA, 2000).



**Figura 08** – Taxa de hidratação do cimento e do cimento-madeira após estágios de enrijecimento e endurecimento (Fonte: HACMI e CAMPBELL *apud* LATORRACA, 2000).

Na figura 07 observa-se que, dentro do intervalo de 0 a 210 minutos, o decréscimo da temperatura liberada pela hidratação dos aluminatos na curva do cimento-madeira, ocorre de forma mais lenta, em um intervalo de tempo maior; na figura 08, a curva característica do cimento evidencia um pico de temperatura característico da formação de etringita em aproximadamente 8 horas, fenômeno este, que ocorre na curva cimento-madeira com um pico exotérmico menor do que na curva do cimento e num intervalo de tempo relativamente maior (aproximadamente 12 horas), denotando assim, o efeito inibitório da biomassa vegetal na hidratação do cimento.

Observa-se, por conseguinte, que a associação da biomassa vegetal altera sensivelmente a sinergia das reações de hidratação da matriz de cimento, contudo, tanto a matriz mineral quanto a fibra de reforço são passíveis de sofrer tratamentos específicos com a finalidade precípua de minimizar os efeitos deletérios oriundos da incompatibilidade química entre o cimento Portland e a biomassa vegetal.

### **2.6.2 Tipologia de fibra de reforço**

Para a confecção de materiais compósitos reforçados, têm-se usado fibras de várias formas e tamanhos, produzidas com os mais variados materiais, como o aço, plástico, vidro e mesmo os materiais naturais. Nos materiais compósitos a introdução de fibras próximas umas das outras podem aumentar a resistência do material, tanto à tração quanto à flexão, além de obstruir a propagação de microfissuras. Contudo, estudos experimentais (ENGLISH *et al*, 1994; BERALDO *et al*, 1996; SAVASTANO, 2000) comprovaram que o desempenho satisfatório das fibras como reforço é fortemente dependente tanto da adaptabilidade do tipo de fibra usada em relação a fatores múltiplos, como o uso final do compósito, direção de esforços aplicados, tipo de matriz, e arquitetura da fibra.

A arquitetura da fibra, ou seja, suas características físicas, como comprimento, largura, espessura, secção transversal, textura de superfície e densidade, não só influenciam fortemente as propriedades físicas de determinados compósitos, como também é um, dentre os vários elementos, que concorrem para uma melhor interação entre cimento-fibra/partícula de madeira. Relacionado às fibras de origem vegetal, o termo abrange características intrínsecas, como o seu diâmetro, comprimento, o alinhamento das fibras e a sua quantidade na matriz.

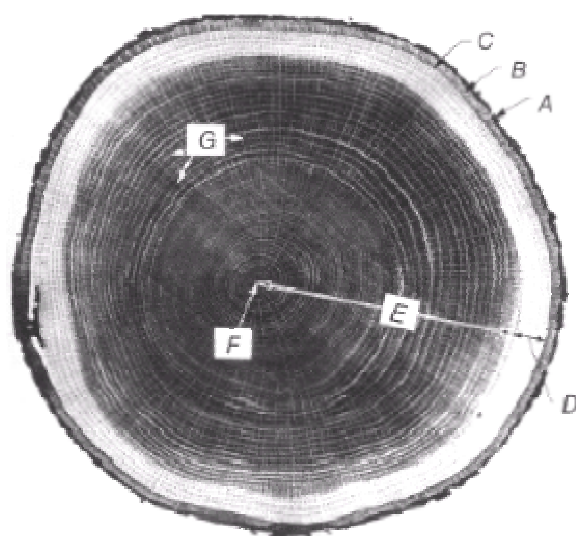
No sentido de trazer à lume elementos que elucidem o comportamento das fibras/partículas orgânicas, especificamente as de madeira, quando associadas à matriz de cimento, lícito uma apreciação sobre a morfologia e algumas propriedades químicas e físicas da madeira.

### **2.6.2.1 Madeira**

Produto do tecido xilemático dos vegetais superiores, a madeira é retirada de troncos das árvores, que apresentam células especializadas na sustentação e condução de seiva. Do ponto de vista comercial, a madeira é preferencialmente obtida em árvores com altura superior a 6 metros (LIMA, 2001). A madeira não é apenas um dos mais belos e versáteis materiais naturais, é também um dos mais variáveis, uma vez que apresenta variações de região para região, de espécie para espécie, dentro de uma mesma espécie, e, mesmo em partes diferentes de uma mesma árvore, madeira também apresenta variações consideráveis (JOHNSTON, 1989).

O tronco do vegetal, à medida de seu crescimento, vai apresentando várias camadas concêntricas e definidas: a medula é a parte central do tronco; mole e esponjosa, é suscetível a ataque de xilófagos. O lenho compreende a maior parte do tronco, situado entre a medula e a casca e apresenta camadas de células decorrentes do crescimento conformando anéis concêntricos (LIMA, 2001).

O lenho é subdividido em setores por linhas que partem da medula em direção à casca, chamados raios medulares, e devido sua conformação e características heterogêneas, o corpo lenhoso é classificado em cerne e alburno. Algumas características das madeiras são bastante influenciadas pela região do tronco de onde a mesma foi extraída: as madeiras extraídas do cerne são conformadas por células vegetais mais antigas e, por conseguinte, apresentam-se compactas, rígidas, pouco atacáveis por xilófagos; as madeiras extraídas do alburno, que é a parte mais externa do lenho, são conformadas por células mais novas do que as do cerne, são de coloração mais clara, de pouca densidade e mais suscetível a ataque xilófago. A casca, ou córtex, é a última camada do tronco, subdividida em o líber, parte interna da casca, composta de fibras verticais formando camadas sobrepostas, e a epiderme, parte externa da casca, áspera, rugosa e cheia de poros (LIMA 2001). A figura 09 ilustra as várias camadas do tronco de uma espécie vegetal superior.



**Legenda :**

- A – Casca
- B – Floema
- C – Câmbio
- D – Albúrnio
- E – Cerne
- F – Medula
- G – Anéis de crescimento

**Figura 09** – Corte do tronco de um vegetal superior ilustrando suas várias camadas (Fonte: Disponível em: <www. fpl. us> Acesso em 28/09/2004).

A madeira é extraída de vegetais superiores, subdivididos em *gimnospermas* (coníferas) e *angiospermas* (folhosas ou frondosas). Tal subdivisão também caracteriza as madeiras e seus derivados segundo propriedades físicas, químicas e morfologia específicas. As *gimnospermas* apresentam em sua estrutura dois tipos diferenciados de células, porém, em sua grande maioria, são do tipo traqueal (traqueídes), que servem tanto para condução de água e nutrientes, quanto para proporcionar rigidez e resistência mecânica ao vegetal; seu comprimento chega a ser cem vezes maior que seu diâmetro; as demais células são parenquimáticas, responsáveis pelo armazenamento de alimento (EAMES, 1961). Outra característica das coníferas diz respeito aos seus extrativos, que não apresentam a mesma incompatibilidade química acentuada com o cimento como os extrativos das *angiospermas*, principalmente pela quantidade e tipologia de substâncias químicas encontradas em seus tecidos celulares.

As *angiospermas*, a seu turno, apresentam uma estrutura celular distinta das coníferas, pois apresentam diferenciação conforme sua função, quais sejam: células condutoras de água e nutrientes, células de armazenamento, similares em estrutura e função às parenquimáticas das coníferas, e células responsáveis pela resistência e rigidez do vegetal (BARROSO, 1978). As células responsáveis pela resistência e rigidez vegetal são denominadas fibras, e são semelhantes aos traqueídes do lenho tardio das coníferas, porém, são mais curtas. Estas células apresentam paredes e cavidades celulares mais espessas e bastante rígidas, que são



fatores determinantes para maiores níveis de resistência mecânica e rigidez, que são características das angiospermas (JOHNSTON, 1989). Os extrativos liberados pelos tecidos celulares das *angiospermas* são fortemente inibidores da hidratação do cimento, o que dificulta sobremaneira a associação de biomassa vegetal oriunda de *angiospermas* com matrizes de cimento Portland.

O tecido parenquimático, responsável pelo armazenamento, pode ser orientado tanto na direção vertical como radial e podem servir como elemento identificador da madeira. Dependendo da orientação do corte da madeira, o parênquima das *gimnospermas*, assim como as fibras das *angiospermas*, pode oferecer uma maior ou menor resistência ao corte.

### **2.6.2.2 Extrativos das madeiras**

Os tecidos celulares da madeira vegetal apresentam uma série de substâncias, em sua grande maioria, orgânicas, que influenciam suas características químicas e físicas. Quando da associação de madeira com o cimento Portland, algumas destas substâncias, genericamente chamadas de “extrativos”, alteram sobremaneira os mecanismos de hidratação do cimento. Conhecer os componentes químicos, seus mecanismos de ação e seus efeitos são de fundamental importância para que se possa usufruir toda a potencialidade das madeiras e seus derivados, seja ela usada de forma isolada, seja em associação com outros materiais, como o cimento Portland.

A madeira apresenta uma constituição química baseada em dois componentes de alto peso molecular: a lignina e a holocelulose. A celulose, que é um polissacarídeo, aparece organizada dentro de cadeias de açúcares que facilitam o transporte no sistema vascular e contribui com a maior parte do total dos componentes - cerca de 60 a 75% (GLASSER e SARKANEN, 1989). A lignina, que apresenta a mesma composição elementar da celulose (carbono, hidrogênio e oxigênio), apresenta-se como uma molécula polifenólica tridimensional, pertencente ao grupo dos fenilpropanos, de estrutura complexa e alto peso molecular, representa 20 a 30% dos componentes (SCHUBERT, 1965).

A associação entre o cimento Portland e madeira é particularmente afetada pelas substâncias desta última, e, estudos realizados (HACHMI & MOSLEMI apud LATORRACA, 2000) mostram que tanto a celulose quanto a lignina não causam depreciação acentuada na resistência à tração do compósito.

Todavia, na tecnologia do concreto e cimento, produtos derivados da lignina são utilizados para a formulação de aditivos químicos, como os tensoativos. Dentre as substâncias derivadas da lignina está o ácido lignosulfônico, seus sais e modificações, empregados como plastificantes redutores de água (SILVA, 1991). Condensados de lignosulfonados modificados também são substâncias derivadas da lignina e são empregadas como superplastificantes (redutores de água com efeito potencializado) com uma redução de água cerca de três a quatro vezes, se comparado a redutores de água convencionais (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Outros dois componentes estão presentes nos tecidos celulares da madeira em menores quantidades e apresentam baixo peso molecular, quais sejam: as cinzas e os extrativos. As cinzas representam a parcela de minerais retirados do solo pelas raízes, e os extrativos, a seu turno, são grupos de uma complexa mistura de polímeros mistos que impregnam as paredes e as cavidades celulares; dentre estas substâncias, tem-se gomas, corantes, amidos, gorduras, resinas, fitosteróis, terpenos e terpenóides, fenóis, taninos, açúcares simples e sais (LATORRACA, 2000).

Grande parte das propriedades organolépticas das madeiras, como, cor, textura, desenho, odor característico, e outras características, são procedentes dos extrativos, que têm sido classificados em diversos grupos, onde o gênero botânico e família, o grau de solubilidade, propriedades físico-químicas e composição estrutural servem como critérios para classificação dos mesmos (JOHNSTON, 1989).

A subdivisão dos extrativos mais aceita é a seguinte (LATORACA, 2000):

- Terpenos
- Substâncias de cadeias alifáticas e cadeias aromáticas
- Carboidratos
- Substâncias nitrogenadas
- Glicosídeos
- Esteróides

Os terpenos, comum em animais e plantas, apresentam relação química e estrutural com a molécula de isopreno, e sua subdivisão é função direta do número de unidade de isoprenos (cinco moléculas de carbono-5C); em espécies folhosas é comum a ocorrência de terpenos com altas unidades de isopreno (CARRAZZONI, 1966). Pesquisas desenvolvidas indicam que os terpenos influenciam muito pouco a resistência à tração do compósito cimento-madeira e seus efeitos não são muito pronunciados (LATORRACA, 2000).

As substâncias alifáticas compreendem principalmente ésteres de ácidos carboxilados (radical oxidrila ou hidroxila) e ésteres de ácidos originados de álcoois com longas cadeias carbônicas. No rol das substâncias alifáticas também é comum encontrar ácidos carboxilados e álcoois livres, porém, os ácidos, em geral, aparecem combinados (LATORRACA, 2000). Os ácidos carboxílicos, em geral, são empregados como aditivos plastificantes redutores de água em matrizes de cimento Portland.

Os fenóis compõem as substâncias aromáticas, dentre eles as lignanas, flavóides e as quinonas, assim como estilbenos e taninos, que a despeito de serem uma macromolécula, figuram dentre os extrativos de baixo peso molecular. Os taninos subdividem – se conforme sua capacidade de hidrólise – hidrolizáveis e não-hidrolizáveis. Grande parte das espécies botânicas, particularmente as *angiospermas* apresentam taninos não-hidrolizáveis (MARQUES, 1950).

No caso dos taninos hidrolizáveis, a subdivisão mais usualmente encontrada é: galotaninos e elagitaninos. Comparativamente aos taninos não-hidrolizáveis ou condensáveis, os hidrolizáveis ocorrem nos vegetais superiores com menor freqüência. Os carboidratos também são extrativos encontrados em grades quantidades nas madeiras, e

particularmente nas *Angiospermas*, os principais carboidratos encontrados são monossacarídeos como glicoses e dissacarídeos, como a sacarose. Um outro grupo de carboidratos, os polissacarídeos também são encontrados, porém em menor quantidade (LATORRACA, 2000).

Há indícios que a grande quantidade de carboidratos presentes nas angiospermas seja um dos responsáveis pela incompatibilidade química entre este tipo de madeira e a pasta de cimento. De fato, substâncias como os açúcares e carboidratos derivados, são utilizadas como aditivos químicos retardadores de pega. Os açúcares agem como retardadores de pega pelo impedimento da formação do C-S-H durante a hidratação do cimento, sendo que a intensidade deste impedimento ocorre é função direta da quantidade de açúcares e da composição do cimento (NEVILLE, 1997). No caso específico do cimento-madeira, os açúcares simples liberados pelas fibras de madeira migram para a superfície dos poros, e há indícios que ocorra então a formação de uma camada que inibe a interação das pastas de cimento e a madeira.

As outras substâncias encontradas em extrativos da madeira são os glicosídeos, esteróides, e as substâncias nitrogenadas. Dentre os glicosídeos se destacam a sapogenina e a saponina. Os esteróides são hormônios, tais como sitosterol e fitosterol. Enquanto que nas substâncias nitrogenadas estão incluídos os alcalóides, aminoácidos ácidos e proteínas que são substâncias de alto peso molecular.

Os extrativos, em sua grande parte, influenciam negativamente a hidratação, pega e ganho de resistência dos compósitos cimento-madeira. Os ácidos graxos, a seu turno, não apresentam efeitos deletérios muito significativos no que diz respeito à tração, assim como o ácido acético e a hemicelulose, que, contudo, influenciam sobremaneira as características de hidratação do cimento, juntamente com os taninos. A glucose, xilose e quercetina, além de reduzirem as taxas de hidratação do cimento, afetam o ganho de resistência do compósito, chegando, em alguns casos, a uma depreciação de 50% de resistência à tração (LATORRACA, 2000).

A despeito do amplo conhecimento disponível acerca da química da madeira, a maioria das pesquisas com compósitos já realizadas indica que a causa exata da inibição de pega e endurecimento dos compósitos cimento-madeira ainda é difícil de apurar, porém, sabe-se que, de todos os responsáveis por tais efeitos, os maiores são os açúcares e extrativos (HACHMI e

CAMPBELL apud LATORRACA, 2000). Contudo, a compatibilidade química entre as pastas de cimento Portland e a madeira não são influenciadas somente pela quantidade de extrativos desta última, deve – se considerar também o pH destas substâncias. Os extrativos de pH ácido inibem com menor intensidade a formação dos produtos de hidratação do cimento. Há indícios de que isto ocorra devido à falta de reações químicas complexas entre os íons de cálcio em suspensão na água combinada e tais extrativos (LATORRACA, 2000).

### **2.6.3 Orientação das fibras durante a confecção do compósito**

Modificações na orientação de fibras curtas de origem vegetal geralmente ocorrem durante a confecção do compósito cimento-madeira, uma vez que as fibras de origem vegetal apresentam-se mais sensíveis à flexão, e por conseqüência, mais suscetíveis à ação da fluência da matriz de argamassa de cimento; em verdade, a matriz de argamassa de cimento pode apresentar acentuada fluidez em algumas direções, o que ocasiona uma orientação das fibras no sentido da fluência da matriz, ou, a fluência ocasiona uma rotação das fibras de forma tal que as mesmas ficam desordenadas na matriz (PILATO e MICHNO, 1994).

A confecção de compósitos reforçados com fibras de pequenas dimensões, como resíduos de fibras de madeira, proporciona um largo escopo de tipologias de reforço, assim como processos de fabricação mais versáteis, porém, é necessário compreender que a distribuição interna das fibras no compósito tem influência direta na distribuição da rigidez, no aumento de ductilidade e em outras propriedades mecânicas dos compósitos cimento-madeira.

### **2.6.4 Vazios e absorção de água pela fibra**

Vários tipos de vazios podem estar presentes na matriz de um compósito. Eles podem ocorrer em todos os tipos de compósitos, ainda que ocorram variações em sua incidência, que dependem da fabricação do compósito e do tipo de matriz em questão. Grandes cavidades vazias podem ser formadas ainda durante o processo de fabricação do compósito, gerando defeitos grosseiros e, na maioria dos casos, alterando sensivelmente seu comportamento mecânico.

No caso de compósitos cimento-madeira, pequenos vazios comumente ocorrem de forma adjacente às fibras da madeira, principalmente em função de infiltrações incompletas nas fibras ou mesmo em decorrência da retração destas causada pela perda de água. Em verdade, tal fenômeno, também denominado “enfenamento”, é decorrente da absorção inicial da água de amassamento da matriz de cimento durante a confecção do compósito, o que reduz a plasticidade do mesmo, dificultando a sua homogeneização e moldagem; a água absorvida é paulatinamente liberada pelas fibras, ocorrendo uma redução em suas dimensões, o que gera, por conseguinte, os vazios entre a fibra e a matriz de cimento.

A presença de grandes áreas vazias ao longo da matriz também ocasiona focos sem fibras de madeira, o que pode ser ocasionado pela susceptibilidade da fibra à fluência da matriz de argamassa, ou até mesmo pela força mecânica aplicada para a moldagem do compósito (HULL e CLYNE, 1996). Vazios, e eventuais descontinuidades como poros e fissuras, têm capacidade de interferir no comportamento mecânico tanto quanto na durabilidade do material. Neste caso, configuram-se os compósitos cimento-madeira, onde o aumento da aderência interfacial entre fibra e matriz eventualmente representam ganhos na resistência mecânica, na durabilidade, e mesmo na ductilidade (SAVASTANO, 1994).

### **2.6.5 A interface fibra/matriz no compósito cimento-madeira**

O desempenho dos materiais compósitos depende não só das propriedades físicas da fibra e da matriz, mas também da região interfacial que existe entre os componentes do compósito. Muitos fenômenos de relevante importância ocorrem nesta região interfacial, e tais fenômenos são dependentes de sua estrutura e das tensões ali geradas e tendenciam a promover deformações plásticas na matriz, influenciam no surgimento e na tipologia de falência da interface. A zona de transição permite a transferência de tensões da matriz para a fibra, influenciando sobremaneira seu comportamento mecânico, e protegendo a fibra de madeira da degradação do meio extremamente alcalino da matriz de cimento (PILATO E MICHNO, 1994).

A zona de transição em compósitos cimento-madeira é particularmente difícil de ser estudada, devido a ser uma tênue zona limítrofe entre fases distintas cuja formação acontece a partir do momento em que o cimento é hidratado. No início da hidratação das pastas de cimento, uma fina película de água forma-se na superfície do agregado ou da fibra/partícula

de madeira, elevando assim a relação a/c em áreas mais próximas ao agregado do que longe dele. Nesta película d'água, de micrômetros de espessura, ocorrem a difusão de íons-cálcio, aluminatos, sulfato, sódio e potássio (SAVASTANO, 2000).

No decorrer da hidratação, os íons em suspensão na água combinada formam os cristais de etringita e hidróxido de cálcio, que devido à relação a/c mais elevada, são cristais de maior tamanho, formando uma estrutura mais porosa do que a matriz cimentante. Com o progresso da hidratação, o C-S-H pouco cristalizado, uma segunda formação de etringita e hidróxido de cálcio preenchem os espaços e ajudam a aumentar a resistência da zona de transição (MEHTA e MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 1997).

No compósito cimento-madeira, as fibras, decorrentes de sua estrutura porosa, induzem a um elevado fluxo de água em sua direção, criando assim, zonas de transição porosas, com presença de macro-cristais de portlandita. Tal fenômeno proporciona uma maior quantidade de água na zona de transição entre a pasta e a fibra, comprometendo a aderência entre as fases do compósito (SAVASTANO, 1994). Pesquisas desenvolvidas (BENTUR E AKERS *apud* SAVASTANO, 1994) relatam excesso de água na zona de transição, devido à porosidade da fibra assim como um acúmulo de Portlandita nas primeiras idades do compósito; diversas condições de envelhecimento foram também testadas e avaliadas, e notou-se a mineralização da biomassa vegetal, que apresentaram os lumens celulares preenchidos com os produtos de hidratação do cimento, acarretando uma sensível redução na tenacidade do compósito.

Pelas próprias características da hidratação do cimento, as cristalizações devem ocorrer ao longo do compósito, contudo, acúmulo de cristais, ou mesmo a falta dela ao longo da região interfacial leva à diminuição da tenacidade, além do que, pode gerar tensões residuais afetam seu comportamento mecânico. A figura 10 ilustra a imagem de elétrons retroespalhados de compósito à base de cimento Portland reforçados com fibra de coco, onde pode ser observada uma zona de transição fissurada em decorrência de sua fragilidade.



**Figura 10** – Imagem por elétrons retroespalhados em compósito de cimento Portland e fibra de coco aos 28 dias. A seta indica a zona de transição fissurada. (Fonte: SAVASTANO, 1992).

A figura evidencia a formação dos macrocristais de portlandita na zona de transição devida sua porosidade, o que favorece as microfissuras de atravessarem a região de interface; o descolamento da fibra acontece em função da perda de água absorvida; tais descolamentos apresentam grande incidência em compósitos cimento-madeira e constituem elementos prejudiciais à aderência fibra-matriz (SAVASTANO, 2000). Para garantir um comportamento mecânico apreciável entre as duas fases do compósito, é necessário fazer com que ambas trabalhem efetivamente em conjunto através do aumento de aderência entre a fibra e a matriz. Para tanto, faz-se mister a redução da porosidade da zona interfacial e a diminuição dos cristais de portlandita em volta da fibra.

## **2.7 Compatibilidade química entre fibra/matriz**

A despeito dos fatores positivos previamente mencionados, a associação de biomassa vegetal com matrizes de cimento Portland é particularmente complexa, uma vez que a quantidade considerável de substâncias lignocelulósicas, cinzas e extrativos liberados pela biomassa, são potencialmente retardadoras da hidratação do cimento e depreciam suas resistência mecânica. O compósito cimento-madeira, além deste, apresenta outros problemas originados a partir da incompatibilidade química entre as fibras vegetais e a pasta de cimento Portland, que é alcalina. Em verdade, a interação de matrizes a base de cimento Portland com fibras vegetais é mais efetiva quando tais fibras apresentam resistências apreciáveis em meios alcalinos semelhantes ao do cimento Portland, cujo pH transita em torno de 12, ou, de outra forma, quando o pH do cimento é baixo.



Em soluções alcalinas a hemicelulose da madeira é dissolvida, formando açúcares simples, como a glucose, xilose e manose, que se dissolvem no meio alcalino do cimento, difundem-se na zona de transição entre o cimento e a madeira (HACHMI e CAMPBELL *apud* LATORRACA, 2000); além da dissolução destas substâncias ocasionarem maior fragilidade nas paredes celulares, tornando as fibras e partículas de madeira mais quebradiças, também provocam efeitos deletérios na reação de hidratação das pastas de cimento, o que pode ser constatado por uma diminuição do calor de hidratação, no aumento do tempo de enrijecimento e diminuição sensível da resistência mecânica do compósito cimento-madeira (SIMATUPANG *apud* LATORRACA, 2000).

Além dos açúcares, outras substâncias liberadas pela madeira onde os princípios ativos são os compostos fenólicos e os carboidratos alteram tanto a morfologia quanto a taxa de crescimento dos cristais de etringita pelo fato de que, uma vez depositadas na interface cimento-madeira, as substâncias retardadoras são rapidamente absorvidas pela camada de cimento já hidratado e alterando a taxa de crescimento dos cristais de hidróxido de cálcio (MEHTA E MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 1997).

A quantidade de substâncias lignocelulósicas presentes na madeira também proporciona maior ou menor intensidade dos efeitos deletérios nas matrizes cimentantes. A madeira verde apresenta maior quantidade de hemicelulose que madeiras parcial ou totalmente secas, tornando os resíduos de madeiras recém abatidas potencialmente inadequadas à associação com o cimento Portland (JOHNSTON, 1989).

Contudo, não é somente nos procedimentos de secagem que se obtém diminuição na quantidade de hemiceluloses da madeira. Sua diminuição é diretamente influenciada pela temperatura, pelo teor de umidade, umidade relativa do ar e quantidade de oxigênio disponível. Pesquisas baseadas no teor de extrativos solúveis em água quente/fria (PIMENTEL e BERALDO, 2000), têm sido realizadas com espécies tropicais no sentido de identificar quais substâncias da madeira afetam com maior intensidade a hidratação do cimento. Segundo tais estudos, as espécies potencialmente utilizáveis são as que apresentaram menor percentual de extrativos.

Conforme JOHNSTON (1989), as substâncias inibidoras da hidratação do cimento Portland aparecem em maior quantidade em espécies folhosas tropicais. Observa-se, por conta disto, que a grande maioria das pesquisas com cimento-madeira utilizam-se de coníferas, exatamente por apresentarem propriedades químicas que as tornam mais compatíveis para serem associadas ao cimento Portland, ao contrário das folhosas, que apresentam maior quantidade de substâncias quimicamente incompatíveis com o aglomerante (CABANGON *et al*, 2000; IWAKIRI e LATORRACA, 2001). Tal fato é corroborado pela escassa literatura técnica disponível acerca de compósitos desenvolvidos com folhosas tropicais e cimento.

A despeito do fato, pesquisadores atuantes no Brasil, como Beraldo, Agopyan, Savastano, Latorraca, Vanderley John, dentre outros, têm mostrado que é possível controlar, até certo ponto, os efeitos negativos da interação cimento-madeira através da adoção de medidas específicas, dentre elas, a extração das substâncias inibidoras do cimento através do tratamento direto das fibras ou partículas de madeira. (WOLFE e GJINOLLI, 1999).

Os tratamentos na biomassa vegetal têm objetivo precípuo de evitar a liberação dos extrativos que inibem a pega e endurecimento das matrizes de cimento, seja pelo confinamento dos mesmos no tecido vegetal, seja pela redução de sua quantidade antes da associação da biomassa com a matriz, e nesta, a maioria dos tratamentos visa modificar a sinergia da hidratação, aumentando a sua velocidade, e diminuindo a água combinada livre, passível de ser absorvida pela biomassa vegetal, que, ao ser posteriormente liberada de volta na matriz, torna-se veículo de propagação dos extrativos.

Isto posto, tratamentos sem refino técnico efetuados diretamente as fibras /partículas vegetais como lavagem das partículas com água em temperatura ambiente, banho térmico, mineralização, impregnação com óleos têm sido empregado em estudos revelando bons resultados. Outros tratamentos como a cura a vapor (IWAKIRI e LATORRACA, 2001) e a injeção de CO<sub>2</sub> (SIMATUPANG *et al*, 1995) também são adotados, porém, prescindem equipamentos específicos para tal.

O uso de aditivos químicos (aceleradores de pega) também figura como uma das formas de mitigar o efeito da associação entre tais materiais. Os aditivos aceleradores são capazes de alterar a velocidade de ionização dos compostos do cimento e a cristalização dos produtos de hidratação, modificando assim, as características normais de enrijecimento e endurecimento

das pastas, sendo esta influência mais atribuída à dissolução dos componentes anidros do cimento, já que a maioria dos aditivos ioniza na água. Os aditivos químicos utilizados especificamente para este fim apresentam em sua formulação algumas substâncias que quando empregadas em pequenas quantidades, agem como retardadores de pega, porém, em quantidades elevadas, comportam – se como aditivos aceleradores (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Os aditivos aceleradores têm como função proporcionar uma evolução na resistência mecânica das pastas de cimento nas primeiras idades, ainda que coincidentemente acelerem a pega (perda de plasticidade) das pastas (NEVILLE, 1997). Um dos aceleradores amplamente utilizados por décadas é o cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ) devido sua eficiente aceleração da hidratação dos silicatos, principalmente o  $\text{C}_3\text{A}$ , possivelmente em função de uma mudança da alcalinidade da água dos poros, ou por funcionar como um catalisador das reações de hidratação, todavia, apresenta desvantagens como a liberação de íons cloreto, e, eventualmente diminui a resistência das matrizes ao ataque por sulfatos (NEVILLE, 1997).

Outro aditivo utilizado é o cloreto de sódio ( $\text{NaCl}$ ), que apresenta efeitos muito semelhantes aos do cloreto de cálcio, porém, dentre os seus vários efeitos, foi observada uma diminuição no calor de hidratação e uma redução na resistência em matrizes de cimento Portland aos sete dias de idade e em idades mais avançadas. Contudo, uma desvantagem dos aditivos à base de cloretos é que são potencialmente causadores de corrosão caso no compósito cimento-madeira sejam adicionadas ferragens.

O nitrito de cálcio e o nitrato de cálcio também são possíveis aceleradores, sendo que o primeiro também comporta – se como inibidor de corrosão (NEVILLE, 1997). O formiato de cálcio e o formiato de potássio, também são alternativas de aceleradores, ainda que o último libere íons de sódio, que pode influenciar negativamente com as pastas e influenciar sua hidratação e reagir com alguns agregados. O formiato de cálcio é mais eficiente quando misturados a cimentos que tenham relação entre  $\text{C}_3\text{A}$  e  $\text{SO}_3$  menor ou igual a 4, portanto os cimentos que são produzidos com carvão com altos níveis de enxofre não proporcionam bom desempenho do formiato de cálcio (NEVILLE, 1997).

### **3 Programa Experimental**

Tencionando atingir os objetivos do presente trabalho, adotou-se uma metodologia específica para a pesquisa bibliográfica e para o programa experimental. Ainda que aparentemente etapas distintas, as mesmas são interligadas, uma vez que, decorrente da falta de Normas Brasileiras para fabricação de compósitos cimento-madeira, o programa experimental teve como elemento norteador alguns trabalhos já desenvolvidos com o referido material.

No presente capítulo traz-se à lume, inicialmente, a metodologia adotada nas retromencionadas etapas. Em segunda instância, faz-se referência à caracterização do material empregado no programa experimental, os tratamentos adotados para os resíduos de madeira, a definição dos traços, os ensaios preliminares e por fim, a produção dos CPC's.

#### **3.1 Metodologia de Pesquisa bibliográfica para suporte ao programa experimental:**

Como metodologia de pesquisa bibliográfica adotou-se um aporte duplo: o de revisão do tema em quadro segundo referências técnicas, e outro, de apoio à fase experimental do presente trabalho. O programa experimental prescindia de referências sobre o compósito cimento-madeira, uma vez que tal material ainda não apresenta, em nível nacional, normatização adequada, assim, a pesquisa bibliográfica proporcionou maior suporte teórico e técnico à condução da caracterização dos materiais e à produção dos compósitos.

### **3.2 Metodologia da Pesquisa laboratorial:**

Durante a fase de pesquisas laboratoriais, as argamassas compósitas produzidas foram estudadas em seu estado fresco e endurecido. No estado fresco, foram realizados apenas ensaios de consistência nas argamassas; durante o estado endurecido, os ensaios levados a termo foram do tipo destrutivo por compressão axial.

O critério considerado para avaliação da influência dos tratamentos dos resíduos foi o do comportamento dos compósitos relativo à resistência à compressão, como realizado em grande parcela das pesquisas desenvolvidas sobre o tema, e que eventualmente pode ser associada a outras propriedades, não somente às mecânicas. Nos itens seguintes, apresenta-se o procedimento de coleta dos resíduos de madeira utilizados no programa experimental, a caracterização dos materiais empregados, os tratamentos realizados nos resíduos coletados, as proporções utilizadas para os materiais, bem como os procedimentos adotados para a confecção dos CPCs e o método de ensaio adotado.

### **3.3 Caracterização dos materiais empregados:**

No presente item é apresentada a caracterização dos materiais utilizados para a confecção das argamassas compósitas, quais sejam:

#### **3.3.1 Areia:**

A areia comercializada em Belém é, geralmente, proveniente de distritos e municípios circunvizinhos (BARATA, 1998). O programa experimental da presente pesquisa utilizou uma areia oriunda do Município de Ourém, distante aproximados 140 km da cidade de Belém; a mesma foi fracionada em sacos de 25 kg e conduzida ao Laboratório de Engenharia Civil da UFPA.

Para início de caracterização do material, realizou-se o ensaio de módulo de finura, massa específica e de massa unitária, segundo recomendações dispostas na NBR 7217 (ABNT, 1987), NBR 9776 (ABNT, 1987), e a NBR 7251 (ABNT, 1982), respectivamente. Realizaram-se também, ensaios para a verificação da umidade crítica e para verificação do

teor de resíduos orgânicos, segundo descrito nas Normas NBR 6467 (ABNT, 1987) e NBR 7220 (ABNT, 1987), respectivamente.

Com vistas à não alteração da relação a/c nos compósitos em função de sua umidade, toda a areia utilizada no programa experimental foi seca em estufa à temperatura média de 90° C durante 48 h., portanto, na tabela 02, onde estão apresentados os resultados dos retromencionados ensaios para a caracterização da areia utilizada, é possível observar uma baixa umidade crítica.

<b>Ensaio de Caracterização – Areia de Ourém-PA</b>	
Módulo de Finura NBR 7217 (ABNT, 1987)	<b>2,30</b> <b>Areia Fina</b>
Massa Específica NBR 9776 (ABNT, 1987)	<b>2,65 kg/dm<sup>3</sup></b>
Massa unitária NBR 7251 (ABNT, 1982)	<b>1,52 kg/dm<sup>3</sup></b>
Umidade Crítica NBR 6467 (ABNT, 1987)	<b>2,95%</b>
Teor de Resíduo Orgânico NBR 7220 (ABNT, 1987)	<b>Aceitável</b>

**Tabela 02** – Resultado dos Ensaio de Caracterização da areia utilizada no programa experimental

Para a caracterização granulométrica da areia empregada no experimento, seguiram-se as recomendações descritas na NBR 7217 (ABNT, 1987). Empregou-se uma peneiradeira mecânica, onde foram adaptadas peneiras com telas de tecido metálico da Série Normal, como descritas na NBR 5734 (ABNT, 1986). O grupo de peneiras acoplado à peneiradeira mecânica pode ser visto na figura 11.

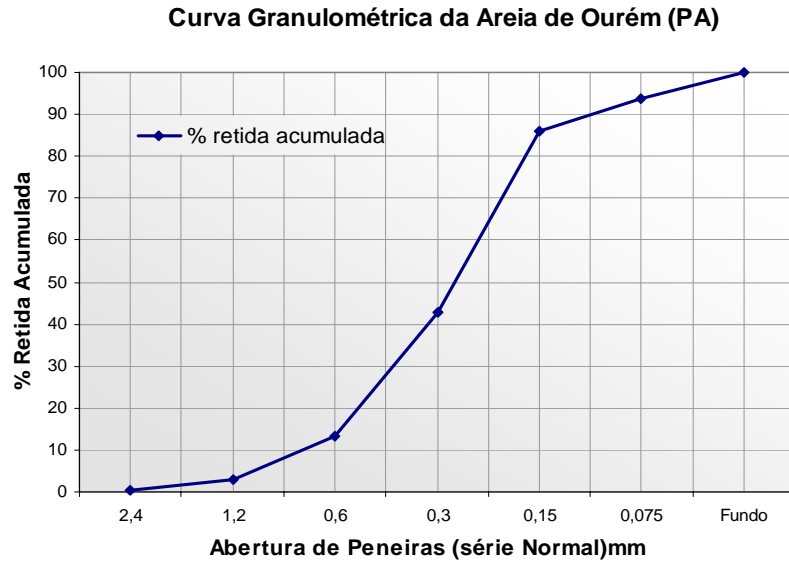


**Figura 11** – Peneiradeira mecânica utilizada para caracterização granulométrica da areia.

O resultado obtido após o peneiramento mecânico do material está apresentado na tabela 03, e curva granulométrica conforme pode ser visto na figura 12.

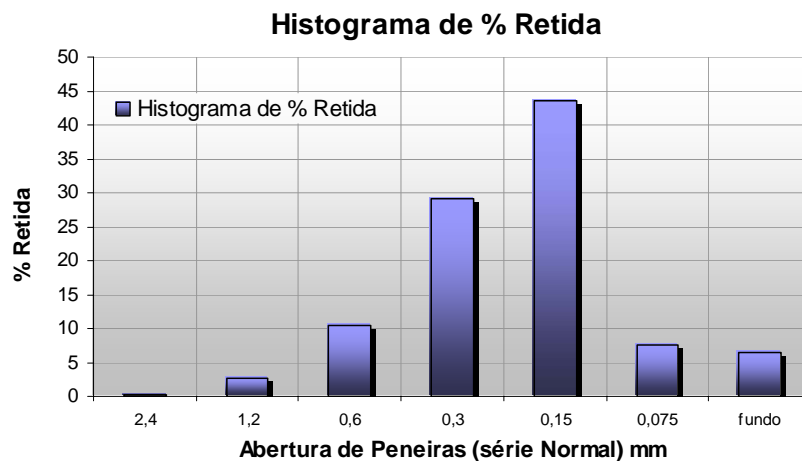
Granulometria da areia proveniente de Ourém-PA								
Amostra: 1000 g				Modulo de finura (NBR 7217): 2,30				
Abertura de Peneira Série Normal (mm)	2,40	1,20	0,60	0,30	0,150	0,075	Fundo de peneira	total
massa retida	3,24	27,42	103,84	291,71	434,49	75,52	63,78	1000
% retida individual	0,32	2,74	10,38	29,17	43,45	7,55	6,38	100 %
% passante	99,68	97,26	89,62	70,83	56,55	92,45	93,62	-
% retida acumulada	0,00	3,00	13,00	43,00	86,00	94,00	100	-

**Tabela 03** – Granulometria da areia proveniente de Ourém-PA



**Figura 12** – Curva granulométrica da areia utilizada no programa experimental

O histograma de porcentagens retidas para a areia de Ourém, observado na figura 13, relaciona a frequência relativa de um evento dentro de uma determinada faixa considerada (MAGALHÃES e LIMA, 2002), neste caso, o evento representa a quantidade de grãos de areia retidos pelas peneiras utilizadas. Observa-se que no histograma, existe uma pronunciada ocorrência de retenção de grãos na peneira de malha 0,15 mm, atestando a classificação da areia (areia fina) utilizada no programa experimental.



**Figura 13** – Histograma de porcentagens retidas individuais nas peneiras de Série Normal para a areia de Ourém.



### 3.3.2 Aglomerante Mineral

O aglomerante mineral utilizado no presente programa experimental é, segundo a NBR 11578 (ABNT, 1991), classificado como cimento Portland composto com pozolana (CP II – Z), com mediana resistência a sulfatos, da classe de resistência a compressão 32, que representa a resistência mínima à compressão que o aglomerante atinge, em MPa, aos 28 dias de idade.

O aglomerante foi conduzido até o Laboratório de Engenharia Civil da UFPA em embalagens de 50 kg protegidas com duas camadas de plástico resistente. Houve cuidado para que os cimentos fornecidos fossem provenientes de um mesmo lote de fabricação, evitando variações mínimas que eventualmente ocorrem em lotes diferentes de cimento.

Um resumo dos ensaios químicos, físicos e mecânicos, gentilmente cedida pelo fabricante; são apresentados na tabela 04, e o boletim técnico completo das análises físicas do cimento pode ser visto no ANEXO A. O boletim de análises do cimento referente aos ensaios químicos, físicos e mecânicos, bem como os ensaios de resistência à compressão, podem ser apreciados no ANEXO B.

Ensaio Químicos				
Ensaio	NBR n	Unidade	Resultados	Especificação Norma NBR 11578/91
Perda ao Fogo-PF	5743/89	%	4,89	≤ 6,5
Óxido de Magnésio-MgO	9203/85	%	3,18	≤ 6,5
Anidrido Sulfúrico-SO <sub>3</sub>	5745/89	%	3,00	≤ 4,0
Resíduo insolúvel	5744/89	%	1,89	≤ 2,5
Equivalente Alcalino em Na <sub>2</sub> O (0,658xK <sub>2</sub> O% + Na <sub>2</sub> O%)	-	%	0,89	Não aplicável
Óxido de Cálcio Livre-CaO (Livre)	7227/90	%	1,21	Não aplicável
Ensaio Físicos e Mecânicos				
Ensaio	NBR n	Unidade	Resultados	Especificação Norma NBR 11578/91
Área Específica (Blaine)	7224/96	cm <sup>2</sup> /g	4015	≥ 2600
Massa Específica	6474/84	g/ cm <sup>3</sup>	3,09	Não aplicável
Densidade Aparente	-	g/ cm <sup>3</sup>	1,1	Não aplicável
Finura-resíduo na peneira 0,075mm (#200)	11579/91	%	1,4	≤ 12,0
Finura-resíduo na peneira 0,044mm (#325)	11579/91	%	6,3	Não aplicável
Água de pasta de consistência Normal	11580/91	%	27,9	Não aplicável
Início de Pega	11581/91	h:min	02:30	≥ 1
Fim de Pega	11581/91	h:min	03:22	≤ 10 (facultativo)
Expansibilidade de Le Chatelier-a quente	11582/91	mm	0,02	≤ 5

**Tabela 04** – Ensaio químicos, físicos e mecânicos para caracterização do cimento utilizado no programa experimental

### 3.3.3 Água

A água utilizada durante todos os ensaios da parte experimental da presente pesquisa foi proveniente do abastecimento direto do Laboratório de Engenharia Civil da UFPA. Como vetor que proporciona a hidratação da matriz de cimento do compósito cimento-madeira, a qualidade e a origem da água empregada no programa experimental é relevante, uma vez que pesquisas (VALENZUELA *apud* LATORRACA, 2000) evidenciaram que as águas fornecidas pelas concessionárias apresentam certas substâncias, adicionadas durante a passagem da água pelas Estações de Tratamento (ETA). Tais substâncias são potencialmente reativas com o cimento, podendo vir a acelerar o seu enrijecimento e endurecimento.

Por um outro lado, a água subterrânea, quando utilizada, pode apresentar pH relativamente baixo, além de possivelmente conter considerável quantidade de partículas orgânicas em suspensão, o que pode causar algum efeito deletério durante a hidratação do cimento. Em que pese o fato das constantes variações da qualidade da água fornecida pela concessionária responsável na cidade de Belém, ou mesmo as condições gerais dos lençóis freáticos, optou-se, no programa experimental, pela utilização da água proveniente do sistema de abastecimento do Laboratório de Engenharia Civil da UFPA, que é de origem subterrânea e que apresenta pH em uma faixa que não oferece riscos de reatividade com o cimento utilizado.

A água utilizada foi coletada diretamente da torneira do referido laboratório em recipiente apropriado e posteriormente conduzida ao Laboratório de Engenharia Química (LEQ) da UFPA para análise físico-química a fim de verificar uma potencial reatividade com o cimento utilizado. Os resultados da análise estão apresentados na tabela 05 e no ANEXO C.

<b>Análise Físico-química da Água Utilizada</b>		
<b>Resultados</b>		
<b>Parâmetros</b>	<b>Torneira do laboratório de Materiais de Construção no LCC</b>	<b>Unidade</b>
<b>Alcalinidade total</b>	154,1	mg/L CaO <sub>3</sub>
<b>Óleos e graxas</b>		mg/L
<b>pH</b>	7,8	-

**Tabela 05** – Tabela de análise físico-química da água do Laboratório de Engenharia Civil da UFPA

### 3.3.4 Aditivo

O aditivo utilizado no programa experimental é uma tipologia de acelerador sem cloretos, formulado para acelerar o tempo de pega e aumentar as resistências iniciais e finais de concretos e pastas de cimento. Comercializado na forma líquida, em embalagens a granel e em tambores metálicos de 200 l., contendo aproximados 282 kg, e em bombonas com 23 kg; o aditivo utilizado apresenta, conforme especificação do fabricante, densidade de 1,39 a 1,43 g/cm<sup>3</sup>.

Para a utilização adequada do aditivo acelerador, o fabricante recomenda que o mesmo deva ser misturado na água de amassamento na proporção de 32,5 a 2500 ml. para cada 100 kg de cimento antes do despejo no cimento anidro. O fabricante fornece dados indicativos de que dosagens mais efetivas situam-se na faixa de 325 ml a 1300 ml para cada 100 kg de cimento. Alguns dados técnicos fornecidos pelo fabricante estão apresentados na tabela 06.

<b>Dados Técnicos</b>	
<b>Aditivo isento de cloreto</b>	
<b>Função principal</b>	Acelerador de pega
<b>Base química</b>	Sais isentos de cloretos
<b>Aspecto</b>	Líquido
<b>Cor</b>	Castanho
<b>Densidade</b>	1,39 a 1,43 g/cm <sup>3</sup>
<b>pH</b>	5 a 7
<b>Teor de sólidos</b>	48 a 53 %

**Tabela 06** – Dados técnicos do aditivo isento de cloreto, fornecidos pelo fabricante (MBT BRASIL – Degussa Construction Chemicals)

### 3.3.5 Resíduos de madeira

Os resíduos de madeira foram coletados em pátio de marcenaria da zona metropolitana de Belém, especificamente no bairro do Guamá, em três grandes sacas plásticas de 50 kg. Conforme observado em visitas *in situ* em diversas oficinas, marcenarias da referida área considerada, os resíduos produzidos pelas máquinas são dispostos em montes desordenados ao longo da própria área de trabalho, fazendo com que os resíduos produzidos sejam variegados, tanto por espécie quanto por sua granulometria.

O material foi então coletado e conduzido até o Laboratório de Engenharia Civil da UFPA. A figura 14 e 15 evidenciam uma das formas de produção da maravalha e pó-de-serra pelo corte e desdobramento de peças de madeira, e, na figura 16, observa-se a variabilidade dos resíduos coletados.



**Figura 14** – Resíduos produzidos durante o corte de peças de madeira.



**Figura 15** - Resíduos produzidos após corte de peças de madeira.



**Figura 16** – Aspecto da dimensão e da composição variada dos resíduos coletados.

Como os resíduos de madeira coletados apresentam variadas espécies botânicas, os mesmos foram classificados nos Laboratórios da Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias (EMBRAPA –PA), e as espécies encontradas estão apresentadas na tabela 07. Na figura 17 é possível observar algumas amostras das espécies botânicas coletadas nos resíduos.

<b>Espécies Nome Científico</b>	<b>Espécies Nome Vulgar</b>
<i>Simarouba Amara</i>	Marupá
<i>Euxilophora Paraensis</i>	Pau Amarelo
<i>Hymenolobuim cf. Excelsum</i>	Angelim Pedra
<i>Cedrela Odorata</i>	Cedro
<i>Astronium sp.</i>	Muiracatiara
<i>Carapa guianensis</i>	Andiroba
<i>Diplotropis sp.</i>	Sucupira
<i>Nectandra Rubra</i>	Louro Rosa
<i>Sextonia Rubra</i>	Louro Vermelho

**Tabela 07** – Relação das espécies botânicas encontradas nos resíduos coletados (EMBRAPA, 2005)



**Figura 17** – Aspecto visual das amostras das espécies botânicas constituintes do resíduo coletado. Observa-se a diferenciação cromática, propriedade organoléptica que varia conforme a espécie botânica.

### 3.3.5.1 Teor de umidade nos resíduos *in natura*

A determinação do teor de umidade dos resíduos *in natura* utilizados no presente programa experimental foi baseada em trabalho desenvolvido por GRANDI (1995). Para tanto, foram retiradas 3 amostras de 100 g. e foram conduzidas, uma de cada vez, à estufa

numa temperatura controlada de 90°C em razão da provável combustão de sua matéria orgânica em temperaturas mais elevadas. Após a secagem das amostras em estufa por um período de 24 h. verificou-se que a média da umidade de equilíbrio dos resíduos era de **12,6%**. A fórmula utilizada para o cálculo do teor de umidade foi baseada em equação utilizada na pesquisa de GRANDI (1995), qual seja:

$$\text{Teor de umidade (\%)}: [(P_i - P_s) / P_s] \times 100$$

Onde se tem:

**P<sub>i</sub>**: peso inicial da amostra de resíduo

**P<sub>s</sub>**: peso seco da amostra

### **3.3.5.2 Massa Unitária do resíduo *in natura* no estado solto e seco**

A massa unitária é uma das características do material que pode influenciar sobremaneira a etapa de confecção dos compósitos, principalmente pelo fato de que, no presente programa experimental, as dosagens utilizadas do resíduo são expressas em porcentagem do volume total de cimento e areia. Os resíduos de madeira quando utilizados secos, apresentam grande capacidade de absorção de água e posterior inchamento (ou enfenamento) em função de seu coeficiente de expansão, o que pode modificar o comportamento de hidratação da pasta uma vez que a água de hidratação acaba sendo absorvida pelo resíduo, podendo causar uma hidratação retardada da pasta.

Para verificação da massa unitária, seguiram-se as orientações descritas na NBR 7251 (ABNT, 1982). O recipiente utilizado apresentou capacidade de **20 dm<sup>3</sup>**, e, após 5 determinações com o mesmo resíduo, chegou-se a um valor de **0,073 kg/dm<sup>3</sup>**.

### **3.3.5.4 Peneiramento do Material -Caracterização Granulométrica do resíduo *in natura***

Segundo pesquisa desenvolvida por LATORRACA (2002), partículas de menor granulometria, para determinadas espécies, podem promover maior índice de inibição do cimento Portland. Observa-se, por conseguinte, que a dimensão das partículas de madeira utilizadas não só direciona para determinados usos específicos, como também proporciona

indícios relativos à resistência mecânica do compósito, em função do exame da granulometria dos resíduos.

Para a classificação e determinação da curva granulométrica das partículas de madeira empregadas na presente pesquisa, utilizou-se as recomendações prescritas na NBR 7217 (ABNT, 1897), além da pesquisa desenvolvida por CAMPOS, BERALDO e HELLMEISTER (2000), que também serviu como referencial para o peneiramento do material. Para caracterização dos resíduos de madeira, amostras de 100 g. do material em questão foram depositadas nas peneiras da série Normal, deixando o conjunto funcionar na peneiradeira mecânica durante 10 minutos. Após este período, as peneiras foram desmembradas do conjunto e o volume de material retido pesado. A tabela 08 apresenta as massas e porcentagens obtidas para os resíduos *in natura*.

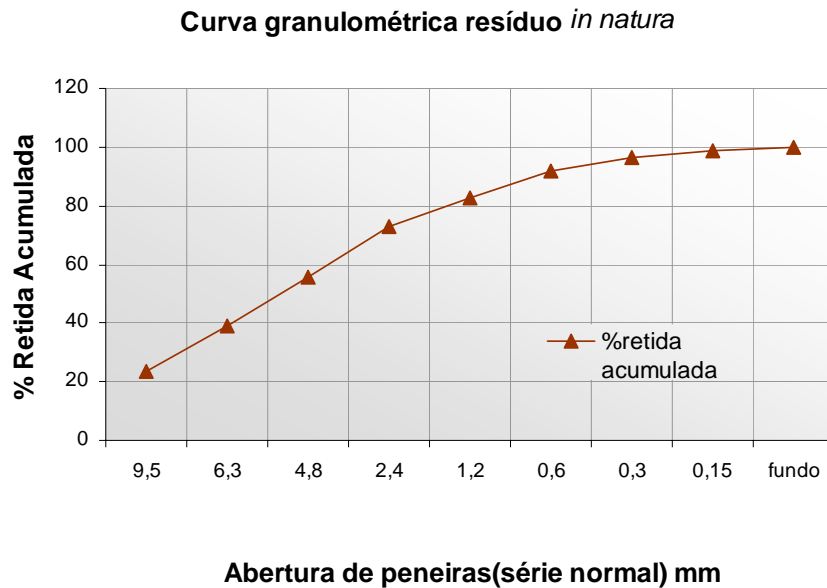
<b>Distribuição granuometrica do resíduo de madeira in natura</b>										
<b>Amostra :100 g</b>										
<b>Abertura de peneira Série Normal (mm)</b>	<b>9,50</b>	<b>6,30</b>	<b>4,80</b>	<b>2,40</b>	<b>1,20</b>	<b>0,60</b>	<b>0,30</b>	<b>0,150</b>	<b>Fundo de peneira</b>	<b>total</b>
<b>Massa retida</b>	23,77	15,27	16,75	17,24	9,75	9,21	4,55	2,15	1,31	100
<b>% retida</b>	23,77	15,27	16,75	17,24	9,75	9,21	4,55	2,15	1,31	100,00
<b>% passante</b>	76,23	84,73	83,25	82,76	90,25	90,79	95,45	97,85	98,69	
<b>% acumulada</b>	0	39	56	73	83	92	97	99	100	0
<b>Massa unitária: 0,073 kg/dm<sup>3</sup></b>						<b>Teor de Umidade: 12,6%</b>				

**Tabela 08** – Distribuição granulométrica do resíduo de madeira *in natura*.

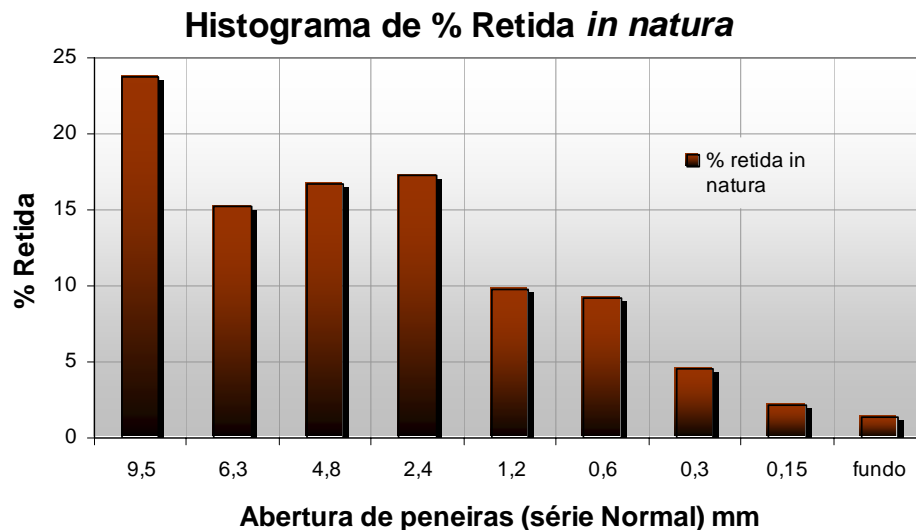
A figura 18 evidencia a curva granulométrica do material orgânico *in natura*; a figura 19, a seu turno, mostra o histograma das porcentagens retidas do resíduo *in natura* por cada peneira utilizada. O histograma de porcentagens retidas relaciona a frequência relativa de um evento dentro de uma determinada faixa considerada (MAGALHÃES e LIMA, 2002) neste caso, o evento representa a quantidade de resíduos retidos pelas peneiras utilizadas.



Observa-se no referido histograma, existe uma pronunciada ocorrência de retenção de resíduos de madeira na peneira de abertura 9,5 mm, seguido de uma abrupta queda e um segundo pico de percentagem retida na peneira de abertura 2,4 mm. Desta forma, tem-se que o resíduo de madeira é composto basicamente de maravalha (partículas de maiores dimensões).



**Figura 18** – Curva granulométrica do resíduo de madeira *in natura*.



**Figura 19** – Histograma de porcentagem retida nas peneiras para o resíduo de madeira *in natura*

### 3.4 Tratamento dos resíduos de madeira

A fim de que os resíduos coletados pudessem ser utilizados para a produção do compósito cimento-madeira, os mesmos receberam tratamentos distintos com intuito de verificar, após a moldagem dos CPCs e posteriores ensaios destrutivos, a influência dos tratamentos adotados no desempenho à compressão das argamassas compósitas confeccionadas. As pesquisas desenvolvidas por FONSECA E LIMA (2002), PIMENTEL e BERALDO (2000), LATORRACA (2000), BERALDO *et al* (1996) e SAVASTANO (1992; 2000) forneceram parâmetros e orientações para o desenvolvimento desta etapa do trabalho. Os tratamentos empregados foram: secagem em estufa (SE), banho térmico (BT) e mineralização (M).

#### 3.4.1 Secagem em estufa (SE)

Uma parte dos resíduos foi inicialmente seca em estufa durante 24 horas sob temperatura controlada a 90° C, pois uma temperatura mais elevada poderia causar combustão dos resíduos; a operação de secagem em estufa pode ser vista na figura 20. Para auxiliar a secagem, foram utilizadas bandejas metálicas, com volume aproximado de 1,4 dm<sup>3</sup> cada uma, onde os resíduos eram depositados sem compactação para que o processo de secagem não fosse dificultado.



**Figura 20** – Retirada do resíduo de madeira da estufa após secagem sob temperatura controlada

Este tipo de tratamento tem por finalidade básica diminuir a quantidade de água, e eventualmente alguma parcela dos extrativos presentes nos lumens celulares dos resíduos, de forma tal que seu teor de umidade tenha atingido seu ponto de equilíbrio. O tratamento é

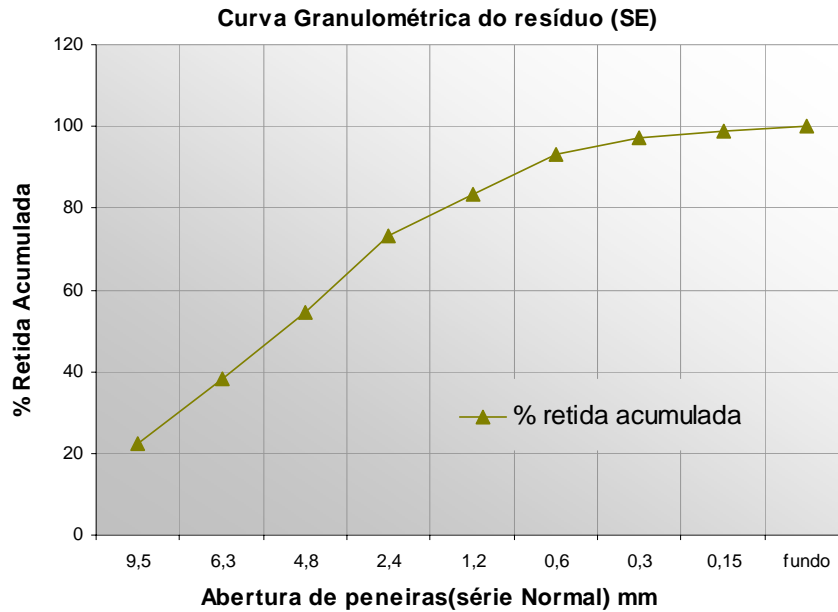
simples, sem nenhum tipo de material ou técnica mais específica. Após o tratamento, separou-se uma amostra de 100 g. de resíduo para que fosse feita a caracterização granulométrica segundo as prescrições descritas na NBR 7217 (ABNT, 1987), conforme pode ser visto pela tabela 09.

Fez-se a distribuição granulométrica do resíduo para todos os tratamentos, pois como os resíduos são frágeis, a sua manipulação para efeito do tratamento poderia ocasionar um particionamento das partículas maiores, variando então, a referida distribuição granulométrica.

<b>Distribuição granulométrica do resíduo de madeira seco em estufa (SE)</b>										
<b>Amostra :100 g</b>										
<b>Abertura de peneira Série Normal (mm)</b>	9,5	6,3	4,8	2,4	1,2	0,6	0,3	0,15	<b>Fundo de peneira</b>	<b>total</b>
<b>Massa retida</b>	22,21	15,92	16,44	18,65	10,02	9,89	4,02	1,87	0,98	100
<b>% retida</b>	22,21	15,92	16,44	18,65	10,02	9,89	4,02	1,87	0,98	100
<b>% passante</b>	22,21	84,08	83,56	81,35	89,98	90,11	95,98	98,13	99,02	
<b>% acumulada</b>		38	55	73	83	93	97	99	100	
<b>Massa unitária: 0,071kg/dm<sup>3</sup></b>						<b>Teor de Umidade: 12,6%</b>				

**Tabela 09** – Distribuição granulométrica do resíduo de madeira após secagem em estufa.

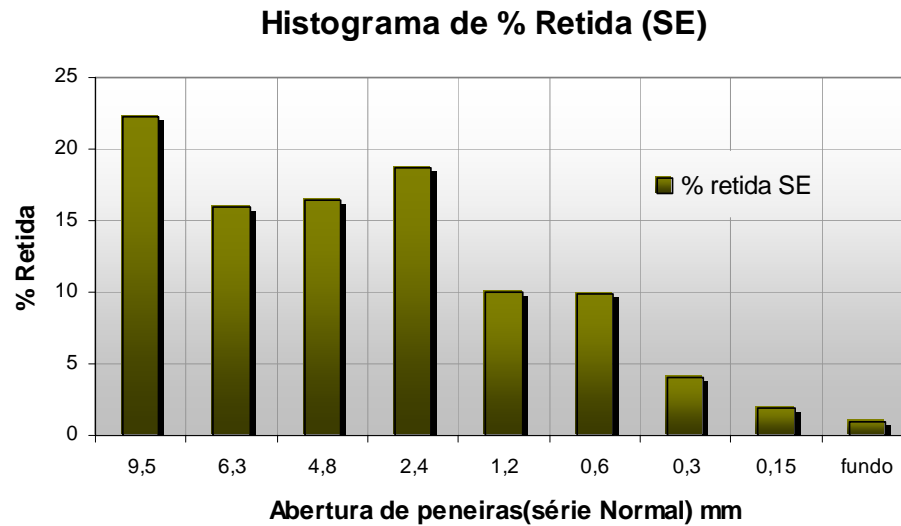
A figura 21 é referente à curva granulométrica dos resíduos após o tratamento de secagem em estufa, e a figura 22, refere-se ao histograma de percentagem retida individual por cada peneira, após secagem dos resíduos em estufa.



**Figura 21** – Curva granulométrica do resíduo de madeira seco em estufa (SE)

O histograma de percentagens retidas da figura 22 relaciona a frequência relativa de um evento dentro de uma determinada faixa considerada (MAGALHÃES e LIMA, 2002) neste caso, o evento representaria a quantidade de resíduos retidos pelas peneiras utilizadas.

Observa-se no referido histograma, à semelhança do histograma dos resíduos *in natura* exposto na figura 19, existe uma pronunciada ocorrência de retenção de resíduos de madeira na peneira de abertura 9,5 mm, seguido de uma abrupta queda e um segundo pico de percentagem retida na peneira de abertura 2,4 mm. Desta forma, tem-se que o resíduo de madeira tratado com secagem em estufa é composto basicamente de maravalha (partículas de maiores dimensões). Assim, sendo, tem-se que através da comparação entre as tabelas 08 e 09 a condução do tratamento SE não alterou a distribuição granulométrica.



**Figura 22** – Histograma de porcentagem retida nas peneiras para o resíduo de madeira seco em estufa (SE)

Após a retirada da estufa, os resíduos foram acondicionados em recipientes plásticos vedados com filme de pvc a fim de que não houvessem variações pronunciadas do teor de umidade, conforme pode ser visto na figura 23.



**Figura 23** – Aspecto dos resíduos de madeira acondicionados em embalagens plásticas vedadas com filme de pvc após tratamento SE.

### 3.4.2 Banho Térmico (BT)

O banho térmico, outro tratamento adotado, foi baseado nas pesquisas desenvolvidas por BERALDO *et al* (1996), CAMPOS, BERALDO e HELLMEISTER (2000) e PIMENTEL e BERALDO (2000), a fim de melhorar a compatibilidade entre o resíduo de madeira utilizado e a matriz de cimento Portland. O tratamento consiste na lavagem das fibras/partículas pela imersão em água fervente durante determinado tempo, e posteriormente despejadas em água em temperatura ambiente. A alta temperatura inicial provoca a dilatação dos poros da madeira, promovendo assim, uma forçosa liberação de substâncias químicas na água. Mesmo quando depositadas em água à temperatura ambiente, as fibras/partículas de madeira continuam liberando estas substâncias. A vantagem deste tipo de tratamento está na liberação mais efetiva de substâncias deletérias em menor tempo.

A concentração adotada para a presente pesquisa foi de 500 gramas de resíduo para 10 litros de água (50 gramas por litro). Tal proporção foi adotada em razão da capacidade máxima permitida pelo recipiente metálico utilizado para condução do tratamento, e a proporção do resíduo foi estabelecida através da imersão gradual dos mesmos na solução. Devido ao enfenamento (inchamento) dos resíduos, uma grande quantidade adicionada de uma só vez poderia fazer com que algumas partículas não estivessem em contato direto com a água, portanto, os mesmos foram paulatinamente adicionados à solução até um limite tal em que todas as partículas dos resíduos estivessem parciais ou inteiramente submersas. Lícito observar que a água usada para o tratamento BT foi coletada do Laboratório de Engenharia Civil, cuja caracterização encontra-se no item 3.3.3 do presente capítulo.

Os resíduos e a água foram deixados em fervura durante 45 minutos, sendo depois coletados da água quente através de peneira e colocados em imersão em água a temperatura média de 27,5 °C durante outros 45 minutos. Seguido da retirada dos resíduos de madeira da água fervida, a mesma foi coletada e levada ao LEQ para análise química. Os resultados obtidos após análise dos efluentes da água fervida com os resíduos estão apresentados na tabela 10 e no ANEXO C.

<b>Análise Físico-Química - Resultados</b>			
<b>Parâmetros</b>	<b>Torneira do Lab. de Mat de Construção UFPA.</b>	<b>Efluente gerado pelo aquecimento da água com resíduo de madeira</b>	<b>Unidade</b>
Alcalinidade total	154,1	81,2	mg/L CaO <sub>3</sub>
Óleos e Graxas	-	22,40	mg/L
pH	7,8	6,5	-

**Tabela 10** – Análise Físico-química dos efluentes da água fervida com resíduo de madeira.

Uma análise visual da água utilizada após a fervura evidencia uma grande mudança em sua coloração, como pode ser constatado na figura 24, atestando que uma parcela de extrativos foi liberada pelos resíduos de madeira durante a operação, porém, a liberação de extrativos não ocorreu apenas na água em fervura, mas na água em temperatura ambiente também. Após o tratamento com banho térmico, foram coletadas 3 amostras para verificação de seus teores de umidade após 24 h. de secagem em estufa a 90°C. O valor verificado foi de **12,5%**.



**Figura 24** – Aspecto visual dos efluentes do resíduo de madeira coletado após o banho térmico

Após a secagem dos resíduos tratados em estufa sob temperatura controlada (90°C), observou-se que o tratamento com banho térmico promoveu modificação em uma das propriedades organolépticas dos resíduos de madeira: as partículas antes do banho térmico apresentavam heterogeneidade cromática, e após o tratamento, os resíduos apresentaram

maior homogeneidade de coloração, dificultando a identificação das diferentes espécies botânicas. As figuras 25 e 26 evidenciam as modificações dos resíduos após o tratamento de banho térmico.



**Figura 25** – Aspecto do resíduo de madeira antes do tratamento com banho térmico



**Figura 26** – Aspecto do resíduo de madeira depois do tratamento com banho térmico

Após o tratamento e posterior secagem em estufa, separou-se uma amostra de 100 g. de resíduo para que fosse feita a caracterização granulométrica segundo as prescrições descritas na NBR 7217 (ABNT, 1987), conforme pode ser visto pela tabela 11.



Distribuição granulométrica do resíduo de madeira após tratamento com banho térmico										
Amostra: 100 g										
Abertura de peneira Série Normal (mm)	9,5	6,3	4,8	2,4	1,2	0,6	0,3	0,15	Fundo de peneira	total
Massa retida	15,13	12,76	18,90	18,85	12,36	11,12	6,09	2,87	1,92	100
% retida	15,13	12,76	18,90	18,85	12,36	11,12	6,09	2,87	1,92	100 %
% passante	84,87	87,24	81,10	81,15	87,64	88,88	93,91	97,13	98,08	-
% acumulada	15	28	47	66	78	89	95	98	100	-
Massa Unitária: 0,073 kg/dm <sup>3</sup>						Umidade crítica: 12,5%				

Tabela 11 – Distribuição granulométrica do resíduo de madeira após tratamento de banho térmico

A figura 27 é referente à curva granulométrica dos resíduos após o tratamento de banho térmico, e a figura 28, refere-se ao histograma de percentagem retida individual por cada peneira, após o banho térmico e posterior secagem em estufa.

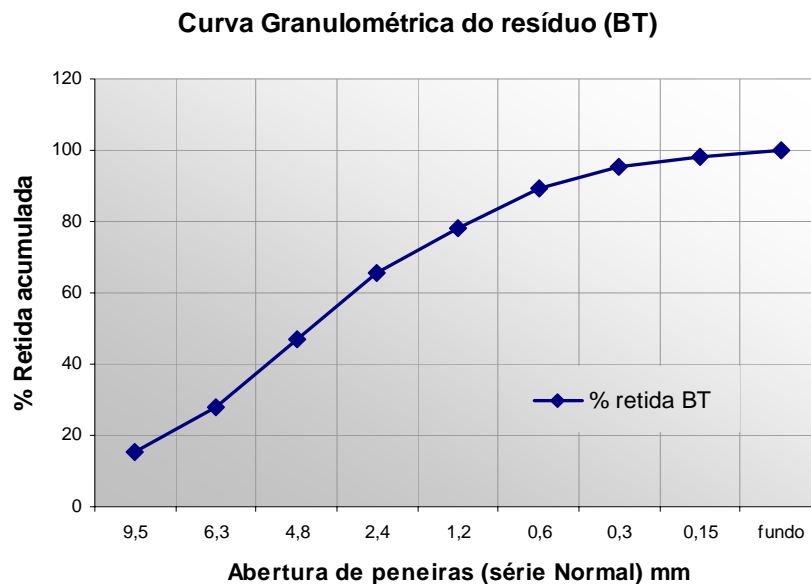
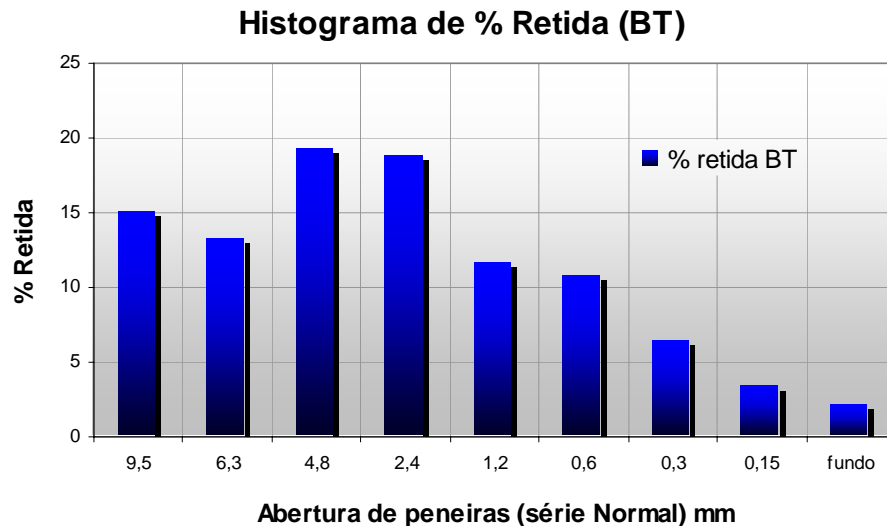


Figura 27 – Curva granulométrica do resíduo de madeira tratado com banho térmico (BT)

O histograma de percentagens retidas da figura 28 relaciona a frequência relativa da quantidade de resíduos retidos dentro de determinadas faixas, representadas pelas peneiras utilizadas.



**Figura 28** – Histograma de porcentagem retida nas peneiras para o resíduo tratado com banho térmico (BT)

Observa-se no referido histograma a existência de duas faixas de maior concentração (peneira de abertura 4,8 mm e 2,4 mm). Em comparação à faixa de concentração verificada para os resíduos *in natura* e secos em estufa (peneiras 9,5 e 6,3 mm), observa-se uma ligeira translação de retenção dos resíduos. Há indícios que a translação de retenção observada tenha acontecido pelo próprio manuseio dos resíduos durante o tratamento, desagregando, por conseguinte, os resíduos de maiores dimensões, e aumentando o número de partículas de dimensões intermediárias.

### 3.4.3 Mineralização (M)

Substâncias aceleradoras que geralmente são usadas em cimentos e concretos podem, igualmente, ser utilizadas diretamente nas fibras e partículas de madeira. Estas, todavia, devem ser imersas em solução aquosa com os aditivos aceleradores. Em verdade, a mineralização das fibras e partículas de madeira com soluções salinas, como cloretos (cloreto de cálcio e magnésio), silicatos (silicato de sódio) e sulfatos (sulfato de alumínio), facilitam na compatibilização da fibra-matriz por promoverem a liberação das substâncias químicas da

madeira na solução e impregnarem as paredes celulares com o aditivo acelerador utilizado (SUKARTANA *et al*, 2000).

Pesquisa desenvolvida (KAWAI *et al*, 2000), mostrou que a adição de cloretos melhora as propriedades mecânicas (exceto densidade e dilatação linear) do compósito cimento-biomassa vegetal de forma proporcional, contudo, concentrações maiores do que 5% em relação à massa total de cimento ocasionam redução nestas mesmas propriedades mecânicas. Apesar do tratamento de mineralização diminuir os efeitos da incompatibilidade química dos compósitos cimento-madeira, existe o inconveniente da solução diluir algumas substâncias lignocelulósicas das paredes celulares, fragilizando, assim, as fibras/partículas de madeira, que se tornam quebradiças, além de ocasionar a corrosão de armaduras caso sejam associadas ao compósito.

A mineralização dos resíduos de madeira da presente pesquisa foi amparada por pesquisas já desenvolvidas, quais sejam: FONSECA e LIMA (2002) e CAMPOS, BERALDO e HELLMEISTER *et al* (1998), onde os resíduos eram impregnados com solução salina (cloreto de cálcio e sulfato de alumínio respectivamente), e nos trabalhos de PIMENTEL e BERALDO (2000), onde o material utilizado para a mineralização foi o sulfato de alumínio diluído na água de amassamento e posteriormente despejado sobre as partículas de cimento e madeira homogeneizados.

Para a presente pesquisa, utilizou-se o sulfato de alumínio, material de fácil acesso no mercado a um valor bastante atraente, uma vez que é vendido como produto para manutenção de piscinas (barrilha). Para estabelecer a proporção entre a água e o sulfato de alumínio da solução mineralizadora, não foram usadas as recomendações do fabricante, uma vez que para o tratamento de piscinas, o sulfato de alumínio é usado como agente flocculante, que não é a mesma função desejada para o tratamento em questão.

Assim, foi considerada a quantidade máxima de água permitida pelo recipiente metálico utilizado para o tratamento dos resíduos, que era de 10 litros. O sulfato de alumínio foi paulatinamente adicionado à água até o ponto de saturação máxima, onde os grânulos do sal não eram mais dissolvidos. Tal ponto de saturação é visualmente identificado pela decantação dos grânulos do sulfato de alumínio no fundo do recipiente. A concentração de sulfato de alumínio utilizada para a mineralização foi de **150 g/l**.

Os resíduos de madeira foram despejados na solução na mesma proporção utilizada no tratamento com banho térmico, que foi de **50 g/l** e posteriormente foram deixados em imersão no recipiente metálico durante 24 horas, como pode ser visto na figura 29, depois coletados e levados para secagem em estufa sob temperatura controlada (90°C). Foram coletadas 3 amostras de 100g. de resíduos tratados com mineralização para determinação do teor de umidade de equilíbrio após secagem em estufa durante 24 h. sob uma temperatura controlada de 90°C. O valor verificado foi de **12,2%**.

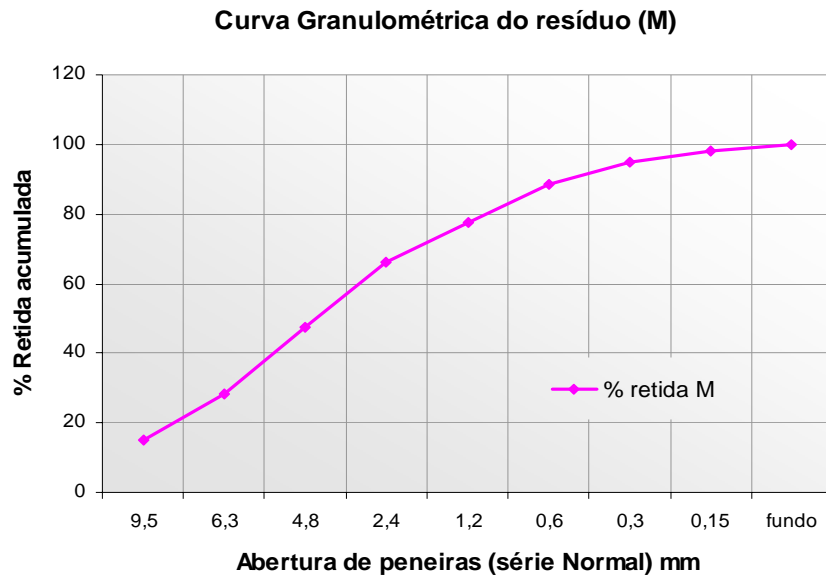


**Figura 29** – Aspecto do recipiente metálico e da água com sulfato de alumínio.

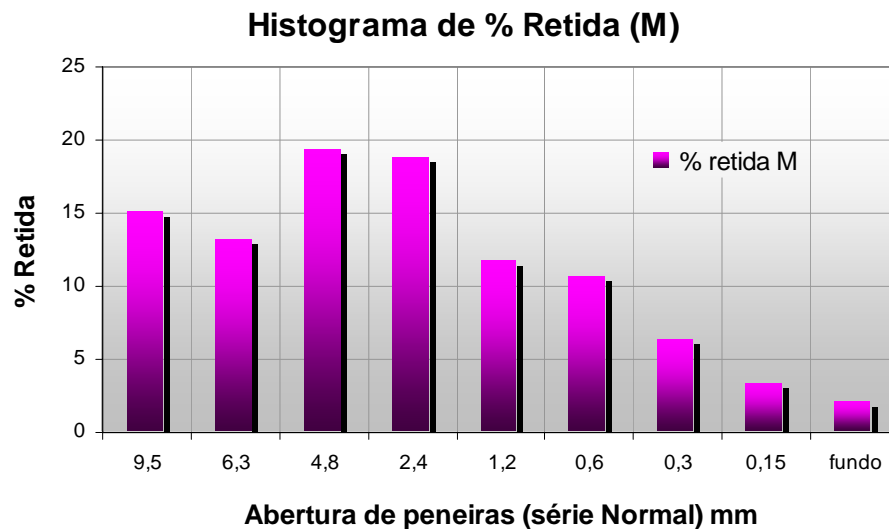
Após o tratamento, separou-se uma amostra de 100 g. de resíduo para que fosse feita a caracterização granulométrica segundo as prescrições descritas na NBR 7217 (ABNT, 1987), conforme pode ser visto pela tabela 12 e pelas figuras 30 e 31.

<b>Distribuição granulométrica do resíduo de madeira após tratamento com mineralização</b>										
<b>Amostra: 100 g</b>										
<b>Abertura de peneira Série Normal (mm)</b>	9,5	6,3	4,8	2,4	1,2	0,6	0,3	0,15	<b>Fundo de peneira</b>	<b>total</b>
<b>Massa retida</b>	14,97	13,16	19,25	18,76	11,62	10,63	6,33	3,25	2,03	100
<b>% retida</b>	14,97	13,16	19,25	18,76	11,62	10,63	6,33	3,25	2,03	100
<b>% passante</b>	85,03	86,84	80,75	81,24	88,38	89,37	93,67	96,75	97,97	
<b>% acumulada</b>	15	28	47	66	78	88	95	98	100	
<b>Massa Unitária: 0,073 kg/dm<sup>3</sup></b>						<b>Umidade crítica: 12,5%</b>				

**Tabela 12** – Distribuição granulométrica do resíduo de madeira após tratamento com mineralização



**Figura 30** – Curva granulométrica do resíduo de madeira tratado com mineralização (M)



**Figura 31** – Histograma de porcentagem retida nas peneiras para o resíduo tratado com mineralização (M)

Observa-se na figura 31 a existência de duas faixas de maior concentração (peneira de abertura 4,8 mm e 2,4 mm), à semelhança do verificado para o histograma de porcentagem retida nas peneiras para os resíduos tratados com banho térmico. Em comparação com os histogramas de concentração dos resíduos *in natura* e tratados com secagem em estufa, observa-se uma ligeira translação de retenção dos resíduos. Há indícios que a translação de retenção observada tenha acontecido pelo próprio manuseio dos resíduos durante o tratamento, desagregando, por conseguinte, os resíduos de maiores dimensões, e aumentando

o número de partículas de dimensões intermediárias, como observado com a condução do tratamento BT.

### 3.5 Traços adotados para o compósito

Para os ensaios preliminares com o compósito cimento-madeira, foi necessário, em primeira instância, estabelecer as proporções dos materiais constituintes. Para tanto, a pesquisa com compósito cimento–madeira desenvolvida por FONSECA E LIMA (2002) e as pesquisas desenvolvidas por LATORRACA (2000), BERALDO *et al* (1996) e SAVASTANO (1992, 2000) apresentaram-se como vasto referencial.

Da pesquisa desenvolvida por FONSECA E LIMA (2002), tem-se que os melhores desempenhos obtidos com as argamassas compósitas produzidas foram alcançados através do uso de aditivos aceleradores de pega, e que os teores de pasta dos compósitos devem envolver por completo os resíduos, sob pena das mesmas tornarem-se veículo de degradação, pois ao serem arrancadas da superfície do compósito, as fibras poderão promover desagregação da matriz de argamassa, diminuindo a resistência à abrasão superficial. Para tanto, é desejável que o teor da adição dos resíduos de madeira em percentagem da massa total de areia, esteja em torno de 1% a 3,5% (FONSECA E LIMA, 2002), como a maioria das pesquisas realizadas no Brasil evidencia, além do que, para o completo envolvimento das partículas/fibras de madeira pela argamassa, aumenta-se o consumo de cimento.

Relativo à quantidade do aglomerante utilizado como matriz do compósito, a mesma pode ser fixada segundo dois critérios: o consumo de cimento por  $m^3$ , onde através da fixação de um traço e do consumo de aglomerante obtém-se o consumo dos demais componentes, ou então se trabalha com a fixação dos traços de acordo com a aplicação da argamassa e o desempenho desejado para a mesma. Algumas pesquisas que foram referência para o presente programa experimental conduziram a fabricação das argamassas compósitas de formas distintas, como a pesquisa desenvolvida por BERALDO (2002), onde foi fixado o consumo de cimento Portland em **680 kg/m<sup>3</sup>**, valor relativamente elevado e muito próximo dos valores empregados por argamassas armadas, porém, para argamassas compósitas, a alta quantidade de aglomerante é justificada pela presença dos extrativos liberados pela madeira, que são altamente inibitórios da reação de hidratação do cimento. A seu turno, FONSECA e LIMA

(2002) desenvolveram pesquisa onde foi fixado o traço, em massa, do compósito (cimento: agregados - 1:3,5; 1:5; 1:6,5).

Assim sendo, com base nos resultados obtidos nas pesquisas anteriormente referenciadas, o presente programa experimental contempla o uso de aditivo acelerador para a confecção dos CPC's, e o traço adotado para todos os CPC's foi fixado em 1:2, contudo, tal traço não está contido no intervalo considerado pelos autores referenciados. De fato, foi adotada uma proporção mais rica em cimento a fim de permitir aos resíduos um melhor envolvimento pela matriz de argamassa, evitando assim, que as fibras/partículas expostas não sejam veículos de degradação do compósito.

Definida das proporções entre aglomerante e agregado mineral, calculou-se a adição dos resíduos de madeira segundo a massa total de areia. O teor de adição dos resíduos de madeira foi fixado em 2,5 %. Tal proporção está contida no intervalo apresentado pelo trabalho de FONSECA e LIMA (2002), ou seja, entre 1% a 3,5%. Deve-se notar que existem duas maneiras distintas para se efetuar as adições: uma por inclusão, ou, acréscimo ao agregado, onde o material é simplesmente adicionado a uma quantidade definida de agregado, outra por substituição, onde a massa do material em questão é adicionada mediante a retirada de massa equivalente do agregado mineral. Na presente pesquisa utilizou-se a adição por substituição do agregado, na proporção retromencionada.

Alguns cuidados foram tomados para a definição da relação a/c: a quantidade de água deveria ser de tal forma que o excesso não viesse a prejudicar o ganho de resistência das argamassas compósitas, fragilizando a zona de transição fibra/matriz (SAVASTANO, 1992; SAVASTANO, 2000), nem a falta tornasse a argamassa seca, dificultando, por conseguinte, a moldagem dos CPC's (FONSECA e LIMA, 2002). Para a obtenção da relação a/c utilizada, foi definido um nível de espalhamento médio do compósito que apresentasse fluidez suficiente de forma a permitir a moldagem manual dos CP's sem maiores dificuldades. O valor considerado como ideal foi de 200 mm, com tolerância de  $\pm 3$  mm, valores estes circunscritos na faixa de tolerância apresentada na NBR 7215 (ABNT, 1996). Para que o valor do espalhamento das argamassas compósitas apresentasse valor dentro da faixa estabelecida, a relação a/c foi de 0,54. Cabe citar que o nível de espalhamento considerado foi usado para todas as argamassas compósitas confeccionadas, independente do tipo de tratamento do resíduo.

Relativo ao uso do aditivo, o mesmo foi misturado à água de amassamento através de adição por substituição da água de amassamento na proporção de 4,85 ml de aditivo para cada kg de cimento, proporção que encontra-se na faixa de uso recomendado pelo fabricante. No presente programa experimental foi empregado um consumo de 23,28 ml de aditivo para cada 4,80 kg. de cimento Portland, representando assim 0,48<sup>5</sup>% da massa total de cimento. Na tabela 13 é apresentado um resumo da composição dos traços moldados.

<b>Composição dos traços moldados</b>				
<b>Denominação</b>	<b>Traço</b>	<b>Teor de adição de resíduos de madeira (% massa areia)</b>	<b>Relação a/c</b>	<b>Teor de aditivo sem cloreto (% massa cimento)</b>
TP – traço piloto	1:2	-	0,54	0,485
SE – traço com tratamento de secagem em estufa	1:2	2,5%	0,54	0,485
BT – traço com tratamento de banho térmico	1:2	2,5%	0,54	0,485
M – traço com tratamento de mineralização	1:2	2,5%	0,54	0,485

**Tabela 13** – Resumo da composição dos traços moldados

### **3.6 Instrumentação e Equipamentos:**

Para levar a termo o presente programa experimental, foi necessária a utilização de equipamentos específicos, seja para a confecção das argamassas compósitas, seja para a condução de ensaios no estado fresco e endurecido. A homogeneização dos materiais para a confecção das argamassas compósitas foi feita através de argamassadeira de duas velocidades, com pá metálica e cuba metálica com capacidade de 10 litros, como pode ser observada na figura 32.





**Figura 32** – Argamassadeira utilizada no programa experimental.

Para os ensaios de consistência, foi empregada uma fôrma específica em forma de tronco de cone, segundo a NBR 7215 (ABNT, 1996), e uma mesa giratória com tampo metálico, de conformidade com a supracitada Norma. A fôrma e a superfície da mesa giratória para a execução dos ensaios de perda de consistência podem ser observadas na figura 33.



**Figura 33** – Aspecto da fôrma e mesa para ensaio de consistência.

Para os ensaios no estado endurecido, as argamassas foram inicialmente moldadas em fôrmas metálicas cilíndricas de 50 mm x 100 mm, conforme prescrito na NBR 7215 (ABNT, 1996). Após o desmolde dos CPC's, os ensaios destrutivos de resistência à compressão axial

foram realizados de conformidade com a supracitada Norma, e, para tal, foi utilizada uma prensa EMIC SSH30, com célula de carga Trd 30, como pode ser vista na figura 34. A referida prensa dispunha de sistema aquisitor de dados conectado a um micro-computador (processador Pentium II) para coletar os dados necessários de carga-deformação.



**Figura 34** – Prensa EMIC SSH30, com célula Trd 30 utilizada nos testes destrutivos do programa experimental.

### **3.7 Moldagem dos corpos de prova**

Os ensaios para avaliação dos tratamentos adotados para os resíduos de madeira compreenderam a moldagem dos quatro traços supracitados. A moldagem dos CPC's de 50 mm x 100mm, para execução dos ensaios destrutivos dos compósitos no ensaio endurecido, foi realizada de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 1996). A escolha das idades para rompimento dos CPC's foi baseada na NBR 7215 (ABNT, 1996), contudo, foram incorporadas outras datas (01 e 21 dias) àquelas referenciadas na retromencionada Norma (03, 07, 14 e 28 dias) a fim de melhor verificar a influência dos tratamentos físicos na resistência à compressão de argamassas de cimento pela presença dos resíduos de madeira. Para cada um dos traços considerados foram moldados 06 conjuntos com 04 corpos de prova cada, e cada conjunto foi rompido em idades específicas de 01, 03, 07, 14, 21 e 28 dias.

Para a homogeneização do traço piloto, as recomendações descritas na NBR 7222 (1994) foram consideradas, contudo, para a homogeneização dos traços compósitos, os procedimentos descritos no programa experimental de trabalho desenvolvido por LATORRACA (2000) por ser o compósito cimento-madeira um material que ainda não apresenta Norma Brasileira para sua confecção.

Assim, a areia foi inicialmente depositada na cuba metálica, seguida do cimento, sendo então acionado o misturador em baixa velocidade por 60 s. A água de amassamento, previamente misturada ao acelerador de pega utilizado, era paulatinamente adicionada, na quantidade respectiva de 475 ml e 25 ml, à mistura aglomerante/agregado, como evidencia a figura 35.



**Figura 35** - Água aditivada sendo parcial e gradualmente adicionada a mistura cimento-areia.

Após a primeira homogeneização, os resíduos de madeira eram adicionados à argamassa de cimento, assim como o restante da água, que era gradualmente adicionada à mistura. A argamassa compósita permaneceu no misturador em baixa rotação durante 10 minutos, com paradas a cada 2 ou 3 minutos para retirada das paredes da cuba componentes que eventualmente não apresentassem perfeita homogeneização com a matriz de cimento. Os resíduos de madeira adicionados na argamassa podem ser vistos na figura 36.



**Figura 36** – Aspecto do resíduo de madeira adicionado à argamassa de cimento.

Após a homogeneização dos materiais constituintes das argamassas compósitas, realizou-se o ensaio de consistência, seguido das moldagens dos CPC's de 50 mm por 100 mm de altura. A argamassa cimento-madeira era depositada em camadas no interior das formas, sempre como auxílio de uma espátula metálica, recebendo cada uma das camadas 30 golpes de soquete manual, conforme prescrito na NBR 7215 (ABNT, 1996).

Terminada a operação, deslizava-se uma régua metálica sobre as bordas da forma a rasar o topo do CPC moldado. Até a desforma dos CPCs, que acontecia 24 horas após a moldagem, os mesmos permaneciam com uma fina lamina de vidro no topo, como mostra a figura 37. Após o desmolde, os corpos de prova eram imersos em solução supersaturada de água e cal até as datas de rompimento.



**Figura 37** – Aspecto de uma série moldada em formas cilíndricas e cobertas com laminas de vidro.

A cura úmida por imersão do CPCs em solução supersaturada de água e cal foi adotada para o presente programa experimental inicialmente por não apresentar nenhum tipo de refino técnico, comparativamente à cura em câmara úmida, ou à cura à vapor. Diversas pesquisas (PIMENTEL e BERALDO, 2000; LATORRACA, 2000) apontam que a cura escolhida para o presente trabalho apresenta melhores desempenhos do que a cura a vapor, pois esta última ocasiona menores níveis de resistência dos CPC's em função da pressão desenvolvida nos poros de ar incorporado no compósito durante o aquecimento (NEVILLE, 1997).

### **3.8 Ensaio Realizados**

Os ensaios laboratoriais do presente programa experimental foram conduzidos com a finalidade de verificar o nível de influência dos tratamentos adotados no comportamento à compressão das argamassas compósitas. Apesar do comportamento à compressão ser a característica mecânica observada para avaliação de resultados, ensaios com as argamassas no estado fresco também foram realizados, evidenciando outros parâmetros de avaliação, passíveis de utilização em estudos futuros. Os ensaios com as argamassa no estado fresco foram conduzido imediatamente após a homogeneização dos componentes, e os ensaios no estado endurecido, realizados em datas específicas, conforme mencionado no item 3.7.

#### **3.8.1 Ensaio de Índice de Consistência:**

Imediatamente após a confecção do traço-piloto, e das argamassas compósitas, através da homogeneização de seus constituintes, procedeu-se o ensaio de consistência de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 1996), para cada uma das argamassas, afim da determinação da perda de consistência do compósito por deformação. As figuras 38 e 39 evidenciam uma etapa do processo, onde a argamassa TP era preparada conforme a supracitada Norma, para a determinação de seu índice de consistência normal.



**Figura 38** – Adensamento da argamassa TP em fôrma específica para a realização do teste de consistência.



**Figura 39** – Aferição do espalhamento da argamassa TP.

Nesta etapa de ensaio, foi aferido o espalhamento de cada uma das argamassas produzidas imediatamente após a homogeneização dos componentes em argamassadeira específica, e após 20 minutos de homogeneização; tal intervalo de tempo foi definido por ser o tempo necessário para o adensamento das argamassas em todas as fôrmas cilíndricas de 50 mm x 100 mm, correspondendo, portanto, ao final da moldagem dos corpos de prova para cada traço produzido.

### **3.8.2 Ensaio de Resistência à Compressão**

Nesta etapa do programa experimental foram realizados ensaios destrutivos de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 1996). As idades de ruptura dos corpos de prova foram as seguintes: 24 horas, 3, 7, 14, 21 e 28 dias. Cabe citar que, para cada data considerada, foram

obedecidos os tempos de tolerância para cada data de rompimento. Para a condução dos ensaios mecânicos, os CPCs moldados foram retirados da solução supersaturada de água e cal no dia anterior ao ensaio, recebendo, posteriormente, capeamento com enxofre cerca de 10 minutos antes do rompimento.

## **Capítulo 4**

### **Resultados e discussões**

O presente capítulo apresenta os resultados, obtidos durante o programa experimental, segundo o estado das argamassas no qual os ensaios foram conduzidos, quais sejam: resultados dos ensaios no estado fresco e resultados dos ensaios no estado endurecido.

#### **4.1 Resultados dos ensaios no Estado Fresco**

##### **4.1.1 Resultados dos ensaios de Índice de Consistência**

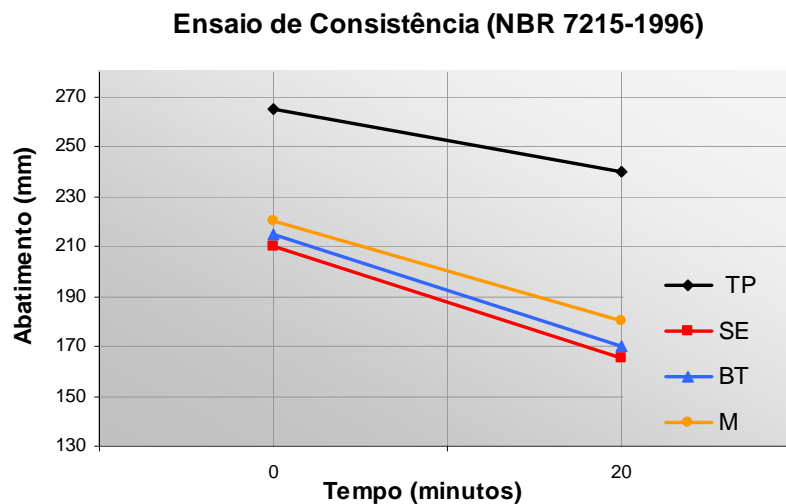
Após a condução dos ensaios, verificou-se que o recuo na consistência para os traços moldados com o resíduo de madeira foram sensivelmente maiores que a perda observada no traço piloto TP, que apresentou consistência inicial e final de 265 mm e 240 mm, respectivamente; o traço SE, a seu turno, apresentou consistência inicial de 210 mm e final de 165 mm; o traço BT apresentou consistência inicial de 215 mm e final de 170 mm. Por fim, o traço M apresentou consistência inicial e final de 220 mm e 180 mm, respectivamente. A tabela 14 apresenta um resumo das médias das consistências para cada traço moldado.



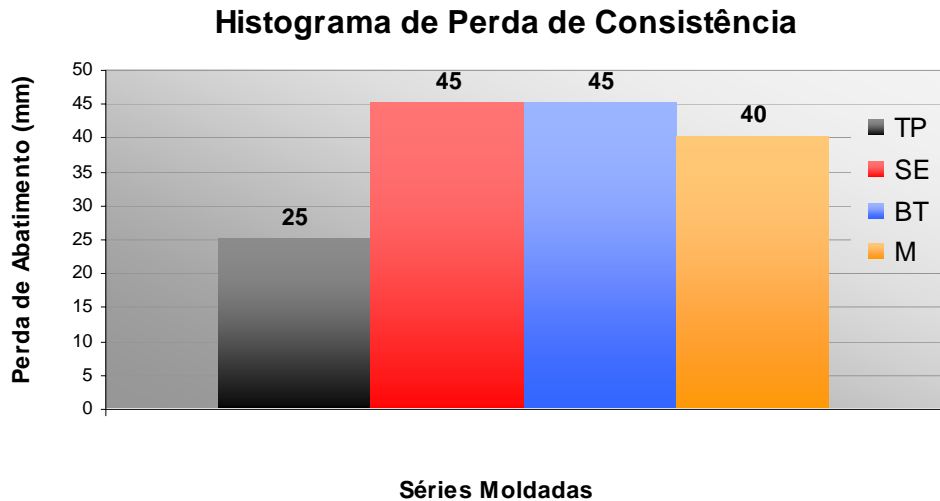
Ensaio de Consistência (NBR 7215-1996)		
Traço	Consistência inicial (CI) em mm	Consistência Final (CF) em mm
Traço Piloto	265	240
Traço SE	210	165
Traço BT	215	170
Traço M	220	180

**Tabela 14** – Resultados dos ensaios de consistência para os traços moldados

No gráfico apresentado na figura 40, observa-se, de forma geral, que para os traços compósitos a consistência inicial é sempre menor do que aquela verificada para o TP. Nota-se também que o traço SE apresentou a menor consistência final (165 mm), e o maior valor para a consistência final foi verificado no traço M (180 mm). No histograma da figura 41, observa-se que mesmo com relativa diferença na consistência inicial para os traços SE e BT (210 mm e 215 mm, respectivamente), ambos apresentaram a mesma diferença de 45 mm entre a consistência inicial e final. O traço M apresentou, além de menor perda de consistência, a menor diferença entre a consistência inicial e a final.



**Figura 40** – Gráfico de perda de consistência para os traços moldados



**Figura 41** – Histograma de diferença entre consistência inicial e final para os traços moldados

Os ensaios de índice de consistência com os traços compósitos, de fato, indicaram que a presença das partículas de madeira na matriz de cimento reduz a fluidez e trabalhabilidade desta última, o que foi constatado durante a pesquisa experimental pela sensível dificuldade de moldagem dos CPC's. A fluidez, e conseqüente trabalhabilidade, das matrizes de cimento apresentam-se relacionada a vários fatores, como a quantidade de cimento, tipo e granulometria do agregado e a relação a/c. Na presente pesquisa, a quantidade de cimento e a relação a/c mantiveram-se constantes para todos os traços moldados, de forma que a redução no abatimento observado para as séries compósitas está, notadamente ligada à estrutura porosa dos resíduos vegetais utilizados.

Pesquisas nacionais desenvolvidas por nomes como GRANDI (1995), AGOPYAN e SAVASTANO (1996), LATORRACA (2000), CAMPOS *et al* (2000), BERALDO *et al* (2000) não apresentam em seus programas experimentais ensaios de verificação do recuo na consistência das argamassas compósitas, muito embora discorram sobre o fenômeno da absorção da água de amassamento pelas fibras/partículas de madeira, fenômeno este, que ocasiona a perda de consistência. AGOPYAN e SAVASTANO (1996) citam que os vazios celulares são responsáveis pelo grande número de poros nas fibras e partículas vegetais, proporcionando assim, uma elevada absorção de água, o que provoca a perda de fluidez pela falta de água na argamassa e, conseqüentemente, um recuo no índice de consistência verificado nos ensaios do presente programa experimental. O fenômeno é também referenciado por LATORRACA (2000), que citando que a água e os sais dissolvidos

(principalmente o hidróxido de cálcio) são absorvidos pelas partículas/fibras, causando o seu inchamento, também denominado por BERALDO *et al* (2002), “enfenamento”.

O fenômeno do enfenamento é potencialmente nocivo para as fibras de madeira imersas na matriz de cimento, uma vez que a água combinada nos capilares desta apresenta elevada alcalinidade e, quando esta água combinada for absorvida pelas fibras de madeira, ela dissolve a lignina e hemicelulose presente nas lamelas celulares e que mantém a coesão das fibrilas da biomassa vegetal, e com a diminuição da capacidade de reforço das células, os lumens são preenchidos com hidróxido de cálcio, depreciando sua flexibilidade e tornando as mesmas mais quebradiças (GRAM *apud* SAVASTANO, 1992).

A estrutura de poros das fibras vegetais utilizadas como reforço em matrizes cimentantes também foi objeto de pesquisa desenvolvida por BOUGUERRA *et al* (1998), onde a determinação dos poros tanto do compósito quanto dos resíduos de madeira utilizados foram feitos através da técnica de intrusão de mercúrio; como resultados da pesquisa, observou-se que a porosidade total do compósito cimento-madeira é diretamente proporcional à quantidade de fibras vegetais adicionadas e que as mesmas, em função de sua estrutura, apresentava forte influência nos níveis de absorção do compósito, o que também direcionava a sua aplicabilidade. A correlação entre a absorção de água e certas propriedades físicas, como a densidade, é corroborada por trabalho desenvolvido por WARDEN *et al* (2000, 2001), mostrando que com o aumento da quantidade de fibras/partículas de madeira, observa-se um aumento na absorção de água e um sensível decréscimo na densidade do compósito.

Considerando os resultados obtidos no programa experimental, e sua posterior análise, tem-se que de todos os tratamentos empregados nos resíduos de madeira, o banho térmico apresentou menor valor para a perda de consistência (consistência final-consistência inicial), conseqüentemente, uma maior fluidez da argamassa compósita.

#### **4.2 Resultados dos ensaios no Estado Endurecido**

Os resultados obtidos após a condução dos ensaios do traço piloto e argamassas compósitas foram tabulados e encontram-se apresentados no ANEXO D. Tais resultados foram tratados através de análise estatística, apresentada no ANEXO E, análise de dispersão, apresentadas no ANEXO F, e análise de variância, apresentada no ANEXO G. A seguir, os s

resultados obtidos no programa experimental são apresentados e comentados segundo a sua ordem de moldagem e condução de ensaios.

#### 4.2.1 Traço Piloto

Como a presente pesquisa tenciona analisar a influência de tratamentos físicos na resistência à compressão dos compósitos cimento-madeira, fez-se necessária a confecção de uma mistura de referência, fixando algumas das variáveis – quantidade de aditivo, traço e relação a/c – que também foram empregadas nas misturas cimento-madeira. A tabela 15 mostra as tensões de ruptura para os corpos de prova moldados com o traço TP. A tabela 16 mostra a tensão média de ruptura para cada uma das idades de rompimento do traço TP; os valores médios foram obtidos através de cálculo estatístico apresentado no ANEXO E.

TP 1:2, com aditivo sem cloreto, relação a/c 0,54						
CPCS	Idades de rompimento / Tensão de Ruptura (MPa)					
	24 horas.	3 dias	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias
1	13,31	24,9	28,41	44,49	39,07	40,28
2	15,10	25,42	37,59	39,52	40,04	39,26
3	12,34	26,88	37,01	30,1	40,68	44,45
4	13,01	28,72	37,12	39,56	43,14	39,99

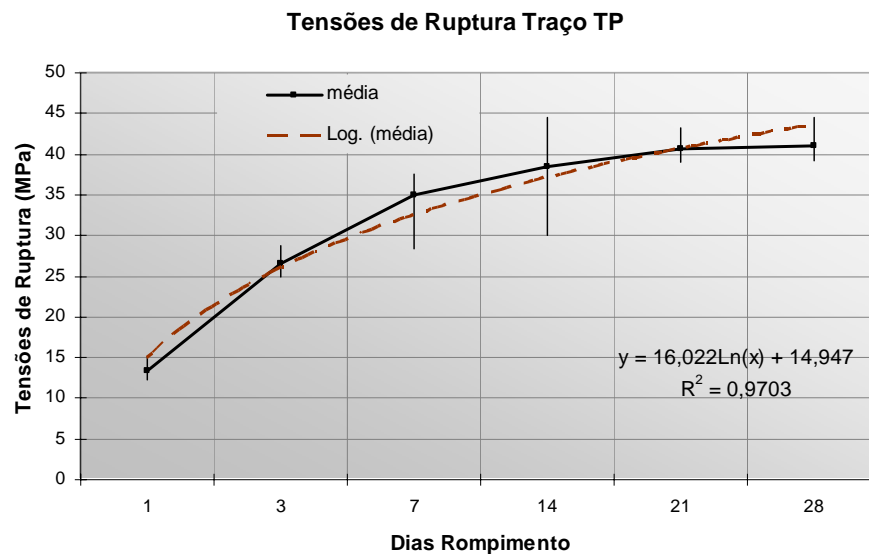
**Tabela 15-** Valores das tensões de ruptura para idades de rompimento da mistura TP

Tensão Média de Ruptura para o Traço TP					
TP 1:2, com aditivo sem cloreto, relação a/c 0,54					
24 horas	3 dias	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias
13,44	26,48	35,03	38,42	40,73	41,00

**Tabela 16** Valores das médias das tensões de ruptura para idades de rompimento da mistura TP

A figura 42 apresenta o gráfico de tensão de ruptura para a mistura, onde é possível observar o comportamento típico de argamassas confeccionadas com cimento, agregado miúdo e água, onde acontece o aumento das tensões de ruptura com o conseqüente aumento da resistência mecânica.

Através do referido gráfico observa-se um crescente aumento de resistência durante as primeiras 24 horas de idade, onde o TP já apresenta bom nível de resistência à ruptura. Tal fato pode ser creditado à ação do aditivo acelerador de pega. Nas semanas subsequentes (do dia 7 ao dia 21), um sensível aumento na resistência mecânica ainda é perceptível, e a partir da idade de 21 dias as tensões de ruptura tendenciam a uma estabilização. A média de tensão de ruptura para 28 dias de idade, para o TP, foi de 41,00 MPa, com variância da amostra de 5,49 %.



**Figura 42** – Gráfico de tensão de ruptura para a mistura TP

O gráfico da figura 42 mostra barras verticais, correspondendo ao desvio padrão dos valores obtidos para cada idade de rompimento. A análise de dispersão para o traço TP é apresentada no ANEXO F.

O gráfico de tensão de ruptura para o traço TP apresenta ainda uma curva, especificamente uma curva logarítmica. Tal curva descreve, teoricamente, o comportamento de variação da tensão de ruptura em função das idades de rompimento observado na curva do modelo experimental do fenômeno em questão. A curva logarítmica é o modelo que apresenta maior proximidade com o comportamento de aumento de resistência à compressão observado na argamassa, uma vez que após 28 dias, é possível assumir que o aumento de resistência é ínfimo, o que faz a curva descrever um comportamento relativamente estável. Desta forma, pelas características próprias da função logarítmica, que praticamente se resumem a uma

baixa taxa, ou velocidade de crescimento, a mesma é a que melhor representa o fenômeno do aumento de tensão de rupturas com o avanço da idade.

É notório no gráfico da figura 42 que a curva logarítmica do modelo teórico encontra-se dentro dos limites do desvio padrão das tensões de ruptura, representado pelas barras verticais em cada idade, denotando assim, sua representatividade para o fenômeno. A forte correlação entre o comportamento teórico e experimental é observada pela proximidade dos pontos de ambas as curvas, bem como é corroborada pelo coeficiente de correlação ( $R^2$ ), que atingiu valor próximo à unidade, ou seja, próximo a 01.

#### 4.2.2 Traço Compósito SE

A tabela 17 mostra os valores das tensões de ruptura para a mistura SE, e a tabela 18 mostra a tensão média de ruptura para cada uma das idades de rompimento do traço SE; os valores médios foram obtidos através de cálculo estatístico apresentado no ANEXO E.

SE, 1:2, teor de adição por substituição. 2,5%, com aditivo , relação a/c 0,54						
CPCS	Idades de rompimento / Tensão de Ruptura (MPa)					
	24 horas	3 dias	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias
1	6,02	10,47	14,24	15,87	19,27	23,61
2	3,7	10,55	14,47	17,09	19,54	21,62
3	6,13	11,42	16,08	17,21	19,67	22,49
4	4,79	11,82	12,64	16,03	22,01	20,81

**Tabela 17** – Valores das tensões de ruptura para idades de rompimento da mistura SE.

Tensão Média de Ruptura para o Traço SE					
SE 1:2, com aditivo sem cloreto, relação a/c 0,54					
24 horas	3 dias	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias
5,16	11,07	14,36	16,55	20,12	22,13

**Tabela 18** - Valores das médias das tensões de ruptura para idades de rompimento da mistura SE.

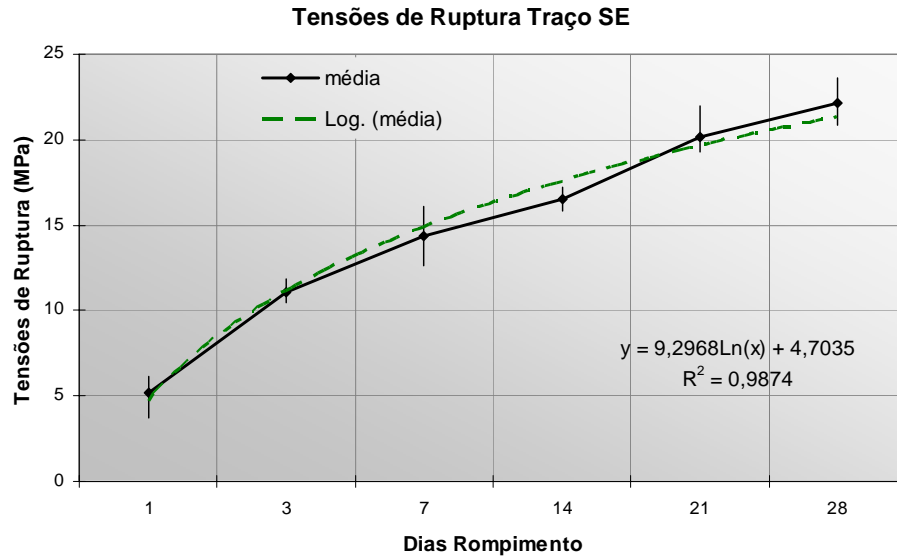
Os valores observados na tabela 18 para o traço SE são sensivelmente menores que aqueles apresentados na tabela 16 para o TP, decorrente da presença das partículas de madeira na matriz.. A média de tensão de ruptura do traço SE para 28 dias de idade foi de 22.13 MPa,

com variância de 1,44 %. A literatura técnica nacional mostra-se relativamente escassa no que se refere à produção de compósitos com fibras e partículas de madeira da espécie dicotiledônea (folhosas), uma vez que tal espécie botânica é fortemente inibitória à hidratação do cimento, dificultando sobremaneira comparativos com os resultados obtidos no presente programa experimental.

Contudo, em pesquisa correlata desenvolvida por PIMENTEL e BERALDO (2000) com associação de resíduos de *Pinus Caribaea var. hondurensis* associados a uma matriz de cimento Portland ARI, e CPII E-32, mostra que argamassas moldadas secas em estufa, e sem nenhum outro tipo de tratamento contra os efeitos deletérios dos extrativos da madeira não apresentaram desempenho satisfatório em relação à resistência à compressão, onde a média de tensão de ruptura para 28 dias de idade foi de 9.02 MPa, com variância de 9.35%.

A pesquisa de FONSECA *et al* (2002) com associação de resíduos de *himenolobium petraeum* – seca em estufa - em matriz de cimento Portland CP IV com aditivo acelerador à base de cloreto também evidenciou que as partículas de madeira provocam diminuição na resistência à compressão das argamassas compósitas. Com efeito, a composição dos produtos hidratados da matriz de cimento Portland é fator preponderante para a definição das propriedades físicas e mecânicas do compósito cimento-madeira. A presença de portlandita (cristais de hidróxido de cálcio) em excesso, por exemplo, pode levar a uma concentração elevada destes cristais na interface das fibras/partículas de madeira com a matriz, provocando assim uma aderência deficiente em função do aumento da porosidade do sistema fibra/matriz. Tal concentração também contribui com a diminuição da durabilidade das fibras/partículas de madeira em função de seu contato direto com o meio alcalino do cimento.

A figura 43 apresenta o gráfico gerado a partir das tensões médias de ruptura do traço SE. A curva observada no gráfico mostra o aumento de tensões de ruptura da argamassa compósita e desvio padrão das tensões para cada idade de rompimento. A análise da dispersão para o traço SE é apresentada no ANEXO F. O comportamento teórico do fenômeno, representado por uma função logarítmica, é bastante próximo do comportamento experimental, o que é ratificado pelo coeficiente de correlação, que atingiu valor próximo à unidade, ou seja, próximo de 01. Exceto para as tensões de ruptura aos 14 dias de idade, a curva do modelo teórico apresentou-se dentro dos limites do desvio padrão das tensões, corroborando assim sua representatividade.



**Figura 43** – Gráfico de tensão de ruptura para a mistura SE

#### 4.2.3 Traço Compósito BT

A tabela 19 mostra os valores das tensões de ruptura para o traço BT, e a tabela 20 mostra a tensão média de ruptura para cada uma das idades de rompimento referido traço; os valores médios foram obtidos através de cálculo estatístico apresentado no ANEXO E.

<b>BT, 1:2, teor de adição por substituição. 2,5%, com aditivo , relação a/c 0,54</b>						
<b>CPCS</b>	<b>Idades de rompimento / Tensão de Ruptura (MPa)</b>					
	<b>24 horas</b>	<b>3 dias</b>	<b>7 dias</b>	<b>14 dias</b>	<b>21 dias</b>	<b>28 dias</b>
1	13,42	19,49	19,96	21,4	26,48	26,18
2	14,32	17,35	20,15	23,54	26,18	25,84
3	12,94	19,83	24,08	24,15	24,94	23,95
4	12,23	17,87	20,75	26,43	23,2	26,53

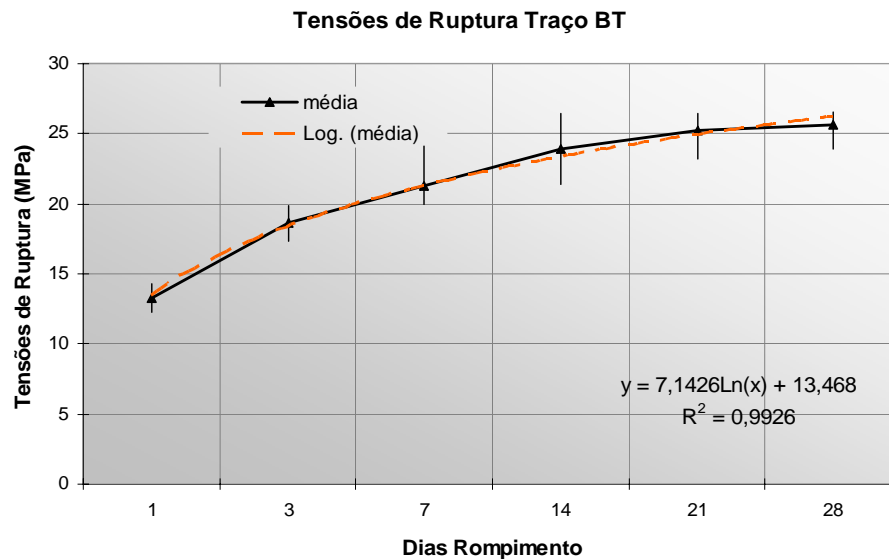
**Tabela 19** – Valores das tensões de ruptura para idades de rompimento da mistura BT

<b>Tensão Média de Ruptura para o Traço BT</b>					
<b>BT 1:2, com aditivo sem cloreto, relação a/c 0,54</b>					
<b>24 horas</b>	<b>3 dias</b>	<b>7 dias</b>	<b>14 dias</b>	<b>21 dias</b>	<b>28 dias</b>
13,23	18,64	21,24	23,88	25,20	25,63

**Tabela 20** - Valores das médias das tensões de ruptura para idades de rompimento da mistura BT.



A figura 44 evidencia o gráfico de tensão de ruptura para a o traço BT, onde a curva gerada a partir das médias das tensões apresenta o desvio padrão para cada uma das tensões verificadas nas idades específicas de rompimento. A análise de dispersão para o traço BT é apresentada no ANEXO F. O modelo experimental pode ser descrito teoricamente através de uma função, representada pela curva logarítmica; observa-se uma grande aproximação entre os pontos obtidos experimentalmente e a curva que representa o modelo teórico. O coeficiente de correlação, que atingiu valor próximo à unidade, ou seja, valor 01, ratifica o exposto. A representatividade do modelo teórico é também ratificada pelo fato da função logarítmica apresentar-se dentro do desvio padrão das tensões de ruptura para cada uma das idades de rompimento.



**Figura 44** – Gráfico de tensão de ruptura para a mistura BT

A média de tensão de ruptura do traço BT para 28 dias de idade foi de 25.63 MPa, com variância de 1.33 %. Os valores obtidos para os ensaios com o traço BT, apresentados na tabela 20, foram mais baixos que aqueles mostrados na tabela 16 referentes ao TP, ratificando que a presença das partículas de madeira na matriz de cimento ocasiona efeitos nocivos à resistência à compressão. Contudo, a comparação entre os resultados obtidos para o traço SE e o traço BT, mostra que ocorreu um sensível acréscimo nos valores para cada uma das idades, indicando o efeito positivo na resistência à compressão em função da lavagem das partículas de madeira através do banho térmico.

Em trabalho similar, CAMPOS *et al* (2000) utilizaram lavagem de resíduos de *Cunninghamia lanceolata* Hook como visando maior compatibilização com a matriz de cimento CP II- E 32 e CP V – ARI. Os resultados mostraram que o tratamento de lavagem não proporcionou melhoras no comportamento à compressão do compósito, contudo, com a matriz de CPV-ARI, o tratamento em questão possibilitou um aumento da ordem de 36% da resistência mecânica do compósito, em comparação com outro compósito moldado com resíduos sem tratamentos.

Em pesquisa correlata, PIMENTEL e BERALDO (2000) reforçam os resultados obtidos por CAMPOS *et al* (2000) em trabalho desenvolvido com associação de resíduos de madeira provenientes de uma indústria; foi empregada a lavagem como tratamento para os resíduos, e, como resultado, observou-se que com a matriz de cimento CP II- E 32, o tratamento não proporcionou resultados favoráveis à resistência a compressão do compósito, porém, com o uso do CP V – ARI, o tratamento favoreceu uma substancial elevação na resistência à compressão aos 28 dias (em torno de 12 MPa). Tal fato pode ser resultante do rápido processo de hidratação do cimento tipo ARI. A hidratação desta tipologia de cimento consome, de forma mais rápida que em outros cimentos, a água disponível, o que reduz a possibilidade da mesma ser absorvida em maiores quantidades pelas fibras/partículas de madeira e depois ser paulatinamente liberada de volta na matriz, trazendo consigo uma considerável quantidade de extrativos.

IWAKIRI e LATORRACA (2001) também desenvolveram pesquisa com painéis moldados com compósito cimento madeira, com resíduos da espécie *Eucalyptus dunni*, cimento Portland “comum” e aditivos aceleradores de pega à base de cloretos. Os resultados obtidos foram relativamente satisfatórios para os traços moldados com a lavagem dos resíduos, indicando uma pequena diferença no comportamento do compósito à compressão quando há variação da tipologia de aditivo acelerador ( $MgCl_2$  e  $CaCl_2$ ).

As referidas pesquisas, mesmo desenvolvidas com resíduos distintos (coníferas) daqueles empregados no presente trabalho (folhosas), apontam para a relativa melhora proporcionada pelo tratamento de banho térmico, e para que seus efeitos proporcionem incrementos substanciais no comportamento do compósito – notadamente a resistência à compressão – o banho térmico foi associado a uma aceleração à cura da matriz pelo uso do CP V – ARI. No caso da presente pesquisa, onde foi utilizado o cimento CPII – Z 32, os

resultados obtidos para o traço BT, apresentados na tabela 19, podem ter sido favorecidos pelo efeito do acelerador de pega utilizado no programa experimental.

#### 4.2.4 Traço Compósito M

A tabela 21 mostra os valores das tensões de ruptura para a mistura M, e a tabela 22 mostra a tensão média de ruptura para cada uma das idades de rompimento do traço M; os valores médios foram obtidos através de cálculo estatístico apresentado no ANEXO E.

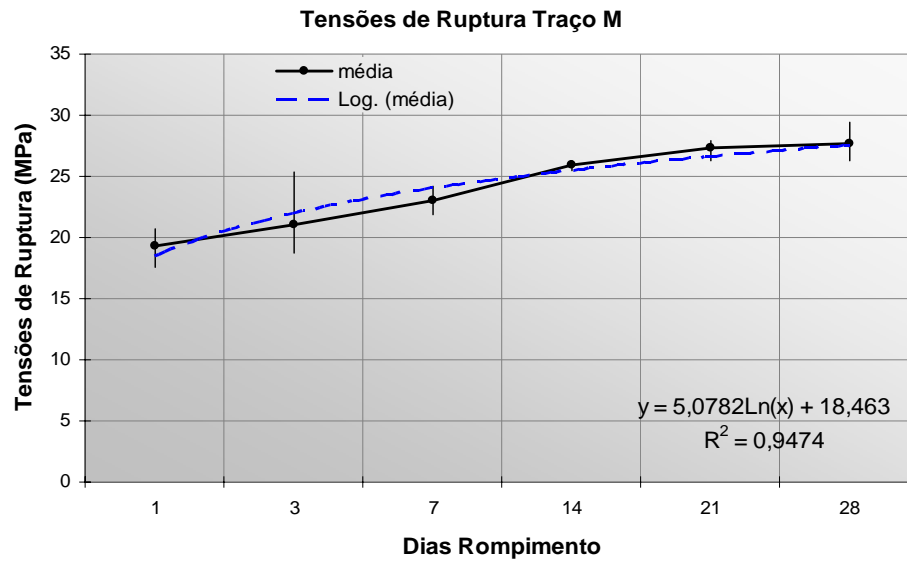
<b>M, 1:2, teor de adição por substituição. 2,5%, com aditivo , relação a/c 0,54</b>						
<b>CPCS</b>	<b>Idades de rompimento/ tensão de Ruptura (MPa)</b>					
	<b>24 horas</b>	<b>3 dias</b>	<b>7 dias</b>	<b>14 dias</b>	<b>21 dias</b>	<b>28 dias</b>
1	20,67	20,38	23,46	25,59	26,23	27,61
2	17,61	25,31	22,48	26,26	27,9	29,45
3	18,1	19,96	24,15	26,28	27,51	27,32
4	20,67	18,73	21,84	25,45	27,52	26,28

**Tabela 21**– Valores das tensões de ruptura para idades de rompimento da mistura M

<b>Tensão Média de Ruptura para o Traço M</b>					
<b>M 1:2, com aditivo sem cloreto, relação a/c 0,54</b>					
<b>24 horas</b>	<b>3 dias</b>	<b>7 dias</b>	<b>14 dias</b>	<b>21 dias</b>	<b>28 dias</b>
19,26	21,10	22,98	25,90	27,29	27,67

**Tabela 22** - Valores das médias das tensões de ruptura para idades de rompimento da mistura M.

A figura 45 evidencia o gráfico de tensão de ruptura para a o traço M, onde a curva gerada a partir das médias das tensões apresenta o desvio padrão das tensões de ruptura para as idades consideradas. A análise de dispersão para o traço M é apresentada no ANEXO F.



**Figura 45** – Gráfico de tensão de ruptura para a mistura M.

Na figura 45 observa-se que a função logarítmica do modelo teórico do fenômeno é bastante representativa, fato observado tanto pela proximidade entre os pontos obtidos experimentalmente e a curva do modelo teórico, quanto pelo valor do coeficiente de correlação, que atingiu valor próximo da unidade, ou seja, valor próximo de 01. Observa-se que a curva descrita pelo modelo teórico, a exceção do intervalo para 14 dias de idade, está no intervalo do desvio padrão.

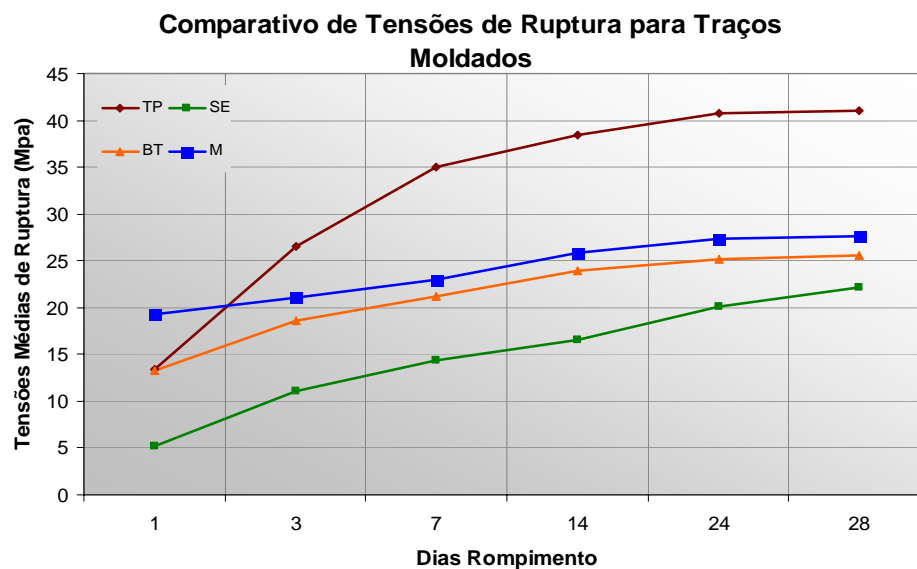
O tratamento de mineralização com sulfato de alumínio e cloreto de cálcio foi empregado em pesquisa desenvolvida por PIMENTEL e BERALDO (2000), com associação de resíduos de madeira, provenientes de uma indústria, com cimento Portland. Os resultados apontaram para um efeito satisfatório do tratamento de mineralização com cloreto de cálcio no comportamento à compressão, tendo o sulfato de alumínio proporcionado comportamento bastante similar e satisfatório, em torno de 13 MPa, mesmo com variações na tipologia de cimento – CII E-32 e CP V-ARI – e no tipo de cura – úmida e à vapor. A seu turno, CAMPOS *et al* (2000) reiteram a significância do tratamento com mineralização em pesquisa desenvolvida com a espécie *Cunninghamia lanceolata* Hook, onde os resíduos foram mineralizados com silicato de sódio e sulfato de alumínio, para maior compatibilização com a matriz de cimento, à qual foi adicionado aditivo acelerador à base de cloreto de cálcio e sulfato de alumínio.

Novamente os resultados obtidos indicaram que a mineralização com sulfato de alumínio proporciona sensível aumento na resistência à compressão, indicando a ocorrência do efeito combinado do acelerador de pega utilizado – a base de cloreto de cálcio – e os sais usados na mineralização - silicato de sódio e sulfato de alumínio. Tal efeito observado por CAMPOS *et al* (2000) sustenta a suposição de que os valores obtidos para as tensões de ruptura do traço M, apresentados na tabela 21, em relação aos demais traços compósitos, podem ter sido favorecidos pelo efeito combinado do acelerador de pega utilizado e do sulfato de alumínio impregnado nas fibras/partículas após a mineralização. Contudo, para ratificar ou refutar tal suposição, é necessário estudo direcionado.

A despeito de seu efeito positivo, a presença de sais, seja para acelerar a cura do cimento, seja para a ação de mineralização, pode causar efeitos deletérios, mais notadamente, a corrosão, em reforços metálicos caso associados ao compósito cimento-madeira.

#### 4.2.5 Comparativo dos traços moldados

A figura 46 mostra a variação das tensões de ruptura para cada um dos traços moldados, a saber: TP, SE, BT e M.



**Figura 46**–Gráfico comparativo de tensão de ruptura para os traços moldados

Torna-se mais perceptível, através da figura 46 o efeito nocivo das partículas de madeira na resistência à compressão do compósito, onde se observa existência de duas faixas distintas de comportamento, onde uma faixa concerne ao TP, e a outra, referente aos traços compósitos SE, BT e M. Na segunda faixa de comportamento, observa-se que os tratamentos de banho térmico e mineralização, quando comparados ao tratamento de secagem em estufa, promovem sensível incremento na resistência à compressão dos compósitos, e mais expressivamente, nas primeiras idades (24 horas).

A média de tensão de ruptura do traço M para 28 dias de idade foi de 27.67 MPa, com variância de 1.74 %. Os valores obtidos para os ensaios com o traço M, apresentados na tabela 22, foram mais baixos que aqueles mostrados na tabela 16 referentes ao TP, assim como os traços SE e BT, contudo, a comparação entre os resultados obtidos para o traço M e os traços SE e BT, mostra que a tensão de ruptura nas primeiras idades (1 dia) para o traço M é sensivelmente maior que o observado para o traço SE e BT (19.26 MPa, 5.16 MPa, 13.23 MPa e, respectivamente), bem como aos 28 dias de idade (27.67 MPa, 22.13 MPa, 25.63 MPa e, respectivamente). Os valores das tensões médias de ruptura do traço M, para cada uma das idades de rompimento, mostraram-se maiores do que aqueles observados para os traços SE e BT, indicando que os resultados obtidos com o tratamento M foram sensivelmente superiores aos demais tratamentos adotados.

Ainda que o traço SE tenha apresentado os menores valores para a resistência à compressão para todas as idades de rompimento, foi o traço que apresentou maior o maior ganho de resistência, ou seja, a diferença entre a tensão de ruptura final e inicial (16.97 MPa). O traço BT, apresentou tensão de ruptura inicial notadamente maior que o traço SE, e um aumento regular nas mesmas até a idade de 14 dias, quando os valores tendenciam a certa estabilização. A diferença observada entre a tensão de ruptura final e inicial para o traço BT foi de 12.40 MPa. O traço M, como já exposto, apresentou em todas as idades, maiores valores para as tensões de ruptura. Os valores obtidos para as tensões nas primeiras idades do traço M foram maiores que os obtidos para o traço TP, possivelmente devido a efeito combinado do acelerador e do sulfato de alumínio, contudo a diferença entre as tensões de ruptura final e inicial foi de 8,41 MPa, sendo o menor ganho de resistência – diferença entre tensão de ruptura final e inicial - observada para os traços compósitos, refletindo a tendência de estabilidade verificada na curva do traço M apresentada na figura 46.

Existem algumas possíveis razões que explicam a perda de resistência à compressão em compósitos cimento-madeira, geralmente ligadas à absorção de água pelas fibras e partículas e posterior liberação na argamassa. Conforme relatado por SAVASTANO (SAVASTANO *et al*, 1994), a água, após contato com as fibras ou partículas de madeira, é liberada na matriz de cimento juntamente com extrativos, dentre eles, fenóis, taninos e açúcares, que contribuem sobremaneira para o retardo na reação de pega e endurecimento da matriz.

Esta mesma água, ao ser liberada de volta à matriz, sendo envolvida por uma película de água (efeito parede), aumentando a porosidade da zona de transição, o que favorece o acúmulo de hidróxido de cálcio nesta mesma zona, tornando-a mais frágil e suscetível a fissuras. A referida pesquisa segue verificando que as fibras de maiores dimensões exercem maior atração sobre a água da pasta. Por conseguinte, a relação a/c nas imediações das fibras de maior dimensão é grande, o que aponta para zonas de transição mais frágeis.

Associado ao exposto, existe ainda o fenômeno do enfenamento, causando não só uma sensível variação dimensional nas fibras e partículas de madeira, mas também gerando vazios na matriz, o que reduz sua resistência mecânica. As pesquisas desenvolvidas por AGOPYAN e SAVASTANO (1996; 1998) mostraram que os vazios entre a matriz e as fibras, em conjunto com uma zona de transição porosa e frágil acabam direcionando a evolução das fissuras em função de sua baixa resistência.

Outra comparação, feita através de análise estatística, especificamente análise de variância, também apresenta resultados expressivos sobre a significância da diferença entre as tensões de ruptura inicial e final para cada tratamento adotado. As tabelas de análise de variância estão apresentadas no ANEXO G.

Para efeito de análise de variância, a mesma foi desenvolvida segundo pares de traços, onde a variável considerada foi o efeito do tratamento físico nos resíduos. Os resultados aqui apresentados são referentes às idades de 01 dia de idade, em função das necessidades de desenformar os compósitos, e 28 dias, data em que é possível assumir que o compósito tenha atingido máxima resistência à compressão. Os resultados para as idades intermediárias estão apresentados no ANEXO G.

A análise dos resultados estatísticos indicam:

Comparativo entre TP e SE:

- 01 dia de idade: o tratamento de secagem em estufa não se apresentou expressivo, pois a tensão média de ruptura apresentou valor muito abaixo do valor obtido para o traço TP.
- 28 dias de idade: a tensão média de ruptura continuou apresentando valor abaixo do valor obtido para o traço TP.

Comparativo entre TP e BT:

- 01 dia de idade: O tratamento com banho térmico possibilitou uma equidade de valores para o traço TP e BT, evidenciando que o tratamento ocasionou melhoria nas tensões de ruptura para o traço compósito. Desta forma, é possível assumir que não existe diferença de resultados para as tensões de ruptura para ambos os traços para a idade de 01 dia.
- 28 dia de idade: a tensão média de ruptura para o BT, em função da presença dos resíduos de madeira, não apresenta o mesmo ganho de resistência observado no traço TP, apresentando, por conseguinte, valor abaixo do observado para o TP.

Comparativo entre TP e M:

- 01 dia de idade: O traço M apresentou resultado acima do esperado, com valor médio acima daquele verificado para o traço TP, manifestando o efeito positivo do tratamento com mineralização na resistência à compressão do traço compósito.
- 28 dias de idade: em comparação com o traço TP, o traço M apresentou mesmo comportamento dos demais traços compósitos, atingindo valor médio de tensão de ruptura abaixo daquele observado pra TP.

Comparativo entre SE e BT

- 01 dia de idade: Comparativamente ao traço SE, o traço BT apresentou melhor valor para a tensão média de ruptura a 01 dia de idade, manifestando o efeito positivo do tratamento com mineralização em detrimento do tratamento com secagem em estufa.
- 28 dias de idade: Aos 28 dias de idade, o efeito do tratamento BT ainda apresentou resultados melhores à resistência a compressão que aqueles observados para o traço SE.



#### Comparativo entre SE e M

- 01 dia de idade: A variável “tratamento dos resíduos” apresentou forte influência no comparativo entre os traços SE e M, onde, o melhor desempenho relativo aos valores de tensão de ruptura a 01 dia de idade foram observados para o traço M.
- 28 dias de idade: Aos 28 dias de idade, a diferença de desempenho entre os dois traços é bastante perceptível, indicado não só pelo cálculo da variância entre ambos, mas também pelo valor médio da tensão de ruptura, indicando melhores resultados para o tratamento de mineralização.

Através de observação do gráfico da figura 46, nota-se a proximidade da curva obtida para o traço BT e M. O valor médio para as tensões de ruptura indicam que os traços são numericamente diferentes, porém, para algumas idades, é possível assumir que os traços são estatisticamente equivalentes. Os resultados da análise de variância para o traço BT e M, contidos no ANEXO G, são apresentados a seguir:

#### Comparativo entre BT e M

- 01 dia de idade: A diferença, numérica e estatística, observada no cálculo da variância entre os traços BT e M é notório ( $f_{calculado} > f_{crítico}$ ), de forma tal que para 01 dia de idade, o tratamento de mineralização proporcionou uma melhora na tensão de ruptura dos traços compósitos, em detrimento do tratamento com banho térmico, existindo, portanto, diferença entre moldar um traço compósito com resíduos mineralizados e outro com banho térmico.
- 03 dias de idade: A partir de 3 dias de idade, observa-se diferença entre valores médios para tensão de ruptura, o que não foi constatado pelo cálculo de variância, onde a variável introduzida para o cálculo estatístico não apresentou relevância numérica ( $f_{calculado} < f_{crítico}$ ), possibilitando assim, assumir não há diferença referente aos resultados obtidos entre moldar um traço compósito com resíduos mineralizados e outro com banho térmico.
- 07 dias de idade: Os valores de  $f$  e  $f_{crítico}$  continuam a indicar que a variável introduzida para o cálculo da variância não evidenciou diferença ( $f_{calculado} < f_{crítico}$ ), possibilitando assumir equivalência estatística entre os resultados obtidos para ambos os traços.

- 14 dias de idade: Os valores de  $f$  e  $f_{crítico}$  continuam a indicar que a variável introduzida para o cálculo da variância não evidenciou diferença ( $f_{calculado} < f_{crítico}$ ), possibilitando assumir equivalência estatística entre os resultados obtidos para ambos os traços.
- 21 dias de idade: Para 21 dias de idade, observou-se que o valor calculado de  $f$  é ligeiramente maior que o calculado para  $f_{crítico}$  ( $f_{calculado} > f_{crítico}$ ). Apesar da diferença numérica, a mesma não é significativa a ponto de permitir assumir que, para a respectiva idade, existe grande diferença estatística entre a moldagem dos traços BT e M.
- 28 dias de idade: Para a última idade de rompimento, a variável introduzida para o cálculo estatístico não apresentou relevância numérica ( $f_{calculado} < f_{crítico}$ ), possibilitando assim, assumir que não há diferença entre moldar um traço compósito com resíduos mineralizados e outro com banho térmico.

## **Capítulo 5**

### **Conclusões e sugestões para pesquisas futuras**

Partindo dos resultados dos ensaios conduzidos pelo programa experimental, obteve-se uma série de conclusões, estas, apresentadas ao longo do presente capítulo. Lícito citar que as conclusões estão circunscritas ao universo do presente estudo, e, alguns fenômenos observados ao longo da condução dos experimentos carecem de estudos exploratórios específicos, a fim de trazer à lume novas considerações sobre as características e comportamento das argamassas compósitas. Assim, ao final do capítulo, também são apresentadas algumas propostas para pesquisas futuras.

#### **5.1 Conclusões dos ensaios no Estado Fresco**

Os ensaios no estado fresco das argamassas moldadas foram os primeiros a serem conduzidos. As conclusões estão apresentadas de conformidade com o tipo de ensaio conduzido.

##### **5.1.1 Índice de Consistência**

Após a condução dos ensaios de índice de consistência, observou-se a existência de duas faixas distintas de comportamento: uma relativa ao traço piloto, e outra, denotando recuo na consistência, referente aos traços compósitos. Estes apresentaram consistência inicial e final sensivelmente menores que os valores observados para o TP. O recuo observado para a consistência dos traços compósitos está relacionado com a presença das partículas de madeira e sua estrutura celular, cheia de lacunas e vazios, que absorvem a água e sais dissolvidos pelo andamento da hidratação do cimento, reduzindo, por conseguinte a consistência e a

trabalhabilidade das argamassas compósitas. Tal premissa pode justificar o comportamento similar observado para os traços compósitos no que diz respeito ao recuo da consistência em comparação ao TP.

O traço M e o traço BT apresentaram o mesmo valor para a diferença entre consistência inicial e final, mas, comparando a consistência inicial e final dos traços BT e M, observa-se que o traço M apresenta valor indicativo de um traço mais fluido que o traço BT, o que, teoricamente, daria ao traço M uma melhor trabalhabilidade para moldagem em perfis, fôrmas, etc. Contudo, durante o programa experimental, especificamente na etapa das moldagens dos corpos de prova com os traços em questão, não foi observada diferença acentuada entre a fluidez do traço BT e M, porém, houve diferença notória entre a fluidez do traço M e traço SE, o que é corroborado pelos valores obtidos.

## **5.2 Conclusões dos ensaios no Estado Endurecido**

Através dos resultados obtidos após a condução dos ensaios das argamassas compósitas no estado endurecido, foi possível avaliar a dimensão da influência dos extrativos das partículas de madeira na resistência à compressão das argamassas compósitas. Da mesma forma, foi possível avaliar o desempenho dos tratamentos adotados com a função de mitigar os efeitos deletérios dos extrativos. As conclusões estão apresentadas de conformidade com o tipo de argamassa moldada.

### **5.2.1 Traço TP**

Os resultados obtidos para o traço piloto já eram esperados, onde o comportamento verificado no aumento de tensões de ruptura para o referido traço é bastante característico de argamassas de cimento-areia. O efeito do aditivo acelerador de pega é observado pelos valores de resistência à ruptura nas primeiras idades (01 dia), o que torna esta tipologia de argamassa produzida potencialmente atraente à indústria de peças e perfis pré-moldados, uma vez que bons níveis de resistência à ruptura nas primeiras idades aceleram a produção, pois que diminuem o tempo de permanência da peça, ou perfil, em moldes. Os valores observados para as tensões de ruptura aos 28 dias também não se mostraram diferentes do esperado.

### **5.2.2 Traço SE**

Os resultados verificados para o traço compósito SE corroboraram as expectativas da presente pesquisa. Observou-se que o efeito da adição de resíduos foi particularmente nocivo à resistência à compressão. Comparativamente ao traço TP, os valores obtidos para as primeiras idades foram bastante baixos, bem como para a idade de 28 dias, onde a média foi de 22.13 MPa. Conclui-se, portanto, que a secagem em estufa foi o tratamento que proporcionou os piores resultados dentre aqueles pesquisados. Relativo à viabilidade do tratamento, o mesmo não apresenta dificuldades de condução, seja pelo refino de técnica ou procedimentos específicos, porém, necessita de uma estufa para realização do respectivo tratamento.

Os efeitos negativos observados na resistência à compressão do compósito SE, além da avaliação à compressão ter sido realizada até 28 dias de idade, não proporcionam margem para maiores afirmações sobre o comportamento do compósito, entretanto, é possível apontar compósito SE como um material alternativo potencialmente utilizável pela construção civil, contribuindo para minimizar os impactos ambientais pelo uso dos resíduos de madeira. Junto com este potencial de uso, vem a possibilidade de redução do consumo de agregado miúdo pela substituição pelos resíduos de madeira, mitigando assim, os impactos ambientais ocasionados por estes resíduos.

O compósito do tipo SE apresenta relativa potencialidade de uso para a produção de peças decorativas, como perfis de rodapé, perfis de rodapê, almofadas de portas, tampos de mesa, balcões e demais peças e artefatos que não estejam submetidos a esforços acentuados quando em serviço. Segundo a média das tensões de ruptura observadas aos 28 dias, o traço SE também apresenta relativo potencial para utilização em argamassas de reboco, contrapisos, enchimentos e para a fabricação de bloquetes pré moldados para revestimento de pisos de baixo tráfego. Contudo, para ratificar tal uso, tornam-se necessários estudos mais específicos, como estudo de durabilidade e resistência à abrasão.

### **5.2.3 Traço BT**

O traço BT, comparativamente ao traço SE, apresentou resultados favoráveis sobre as tensões de ruptura. Verificou-se que o melhor desempenho em relação à resistência à compressão está diretamente ligado ao tipo de tratamento dos resíduos, uma vez que para os

traços compósitos, mantiveram-se constantes a quantidade de cimento, agregado, resíduo e aditivo, variando somente o tipo de tratamento adotado. Em comparação com o traço TP, o valor médio obtido para a resistência à compressão nas primeiras idades foi bastante satisfatório (13,23 MPa), situando-se na faixa de valor obtido para o traço TP (13,44 MPa), todavia, a média obtida para 28 dias de idade (25.63 MPa) foi bastante inferior ao TP (41 MPa).

Em comparação com o traço M, mesmo com ligeira diferença numérica observada para as médias dos valores de tensão de ruptura, a partir de 3 dias de idade, não há diferença estatística entre os resultados obtidos para o traço BT e M. Desta forma, a variável interveniente na escolha de um traço, em detrimento do outro, passa a ser o maior ou menor refino técnico no processo de execução do compósito, a maior ou menor facilidade de moldagem, ou, o maior ou menor custo de produção.

De posse dos resultados, conclui-se que possível apontar compósito BT como um material alternativo potencialmente utilizável pela construção civil, contribuindo para minimizar os impactos ambientais pelo uso dos resíduos de madeira. Junto com este potencial de uso, vem a possibilidade de redução do consumo de agregado miúdo pela substituição pelos resíduos de madeira, mitigando assim, os impactos ambientais ocasionados por estes resíduos.

O tratamento com banho térmico é bastante simples de ser realizado, não apresenta necessidade de equipamentos específicos, exceto uma estufa para procedimentos de secagem após o tratamento. Os valores obtidos para a resistência à compressão nas primeiras idades (24 horas) torna o traço BT potencialmente atrativo para uso na indústria de pré moldados, onde são necessários bons níveis de resistência nas referidas idades a fim de permitir maior sinergia no desmolde de peças e perfis. Apesar da avaliação à compressão ter sido realizada até 28 dias de idade, o que não permite de maiores afirmações sobre o comportamento do compósito, o traço também apresenta relativo potencial para fabricação de blocos de vedação, blocos para pavimentação de baixo tráfego, painéis divisórios e chapas para revestimento. O compósito apresenta ainda, relativo potencial para ser usado de maneira análoga ao concreto leve, contudo, para ratificar tais suposições, são necessários estudos mais específicos.

### 5.2.4 Traço M

A resistência à compressão do traço M nas primeiras idades (24 horas) foi superior ao traço TP (19.26 MPa e 13.44 MPa, respectivamente). Há indícios que o melhor comportamento da resistência à compressão do compósito seja decorrente da ação conjunta do aditivo acelerador e do sulfato de alumínio empregado na hidratação da matriz cimentante. O fato em questão necessita de estudos direcionados para corroborar os indícios observados.

De forma geral, o tratamento com mineralização mostrou-se mais eficiente que o tratamento de secagem em estufa, evidenciando o melhor desempenho dos compósitos preparados com os resíduos tratados com mineralização. Todavia, a despeito da sensível diferença entre o traço M e BT na idade de 01 dia, estatisticamente os resultados para as demais idades são equivalentes, fazendo com que a instância decisória para a adoção de um traço em detrimento do outro recaia sobre o refino de produção, facilidade de moldagem, e custos.

De posse dos resultados, conclui-se que possível apontar compósito M como um material alternativo potencialmente utilizável pela construção civil, contribuindo para minimizar os impactos ambientais pelo uso dos resíduos de madeira. Junto com este potencial de uso, vem a possibilidade de redução do consumo de agregado miúdo pela substituição pelos resíduos de madeira, mitigando assim, os impactos ambientais ocasionados por estes resíduos.

Relativo à viabilidade de condução do tratamento, o mesmo apresenta facilidade de condução, pois necessita de recipiente metálico e sulfato de alumínio para imersão dos resíduos, além de estufa para posterior procedimento de secagem. A despeito da avaliação à compressão ter sido realizada até 28 dias de idade, o que não permite de maiores afirmações sobre o comportamento do compósito, o mesmo apresenta relativa possibilidade de emprego na indústria de pré-moldados, principalmente para a produção de blocos e painéis de vedação, blocos para pavimentação e chapas para revestimentos. O compósito apresenta ainda, relativo potencial para ser usado de maneira análoga ao concreto leve, contudo, para ratificar tal suposição, necessita de estudos mais específicos.

### 5.3 Sugestões para pesquisas futuras

O compósito cimento-madeira confeccionado com resíduos de madeira (pó-de-serra e maravalha) apresenta potencial para ser absorvido como material de uso da Indústria da Construção Civil. A Amazônia, em sendo região onde o extrativismo vegetal ainda é parcela considerável de geração de divisas econômicas, apresenta problemas inerentes a esta atividade, como a intensa depredação da floresta, bem como a inadequação dos destinos dados aos resíduos e rejeitos de produção, o que também ocasiona graves impactos ambientais.

Ao contrário do que acontece em outras regiões, particularmente Sudeste e Centro-Oeste, onde tais resíduos servem de matéria-prima base para produção de artefatos como briquetes de cimento-madeira, chapas, blocos de vedação e revestimento, a região Amazônica ainda carece de estudos mais amplos visando o reaproveitamento dos resíduos e rejeitos gerados pela indústria madeireira.

Como complemento da presente pesquisa, sugere-se a realização dos seguintes estudos:

- a) Análise de custos do tratamento dos resíduos de serraria para a produção de compósitos cimento-madeira;
- b) Verificação do índice de inibição das espécies botânicas utilizadas no presente trabalho;
- c) Fabricação de compósito cimento-madeira utilizando uma única espécie vegetal, preferencialmente, as que apresentem maior utilização em serrarias e correlatos e que, conseqüentemente, proporcionam maior geração de resíduos;
- d) Ensaios de resistência à abrasão, absorção e durabilidade por exposição ao tempo;



- e) Influência no comportamento à compressão do compósito com matrizes cimentantes de baixa alcalinidade;
  
- f) Influência no comportamento à compressão do compósito com cimentos de alta resistência inicial;
  
- g) Verificar o potencial de lixiviação e liberação para o meio ambiente do sulfato de alumínio utilizado na mineralização, bem como o potencial ataque do sulfato em armaduras.

## **Capítulo 5**

### **Conclusões e sugestões para pesquisas futuras**

Partindo dos resultados dos ensaios conduzidos pelo programa experimental, obteve-se uma série de conclusões, estas, apresentadas ao longo do presente capítulo. Lícito citar que as conclusões estão circunscritas ao universo do presente estudo, e, alguns fenômenos observados ao longo da condução dos experimentos carecem de estudos exploratórios específicos, a fim de trazer à lume novas considerações sobre as características e comportamento das argamassas compósitas. Assim, ao final do capítulo, também são apresentadas algumas propostas para pesquisas futuras.

#### **5.1 Conclusões dos ensaios no Estado Fresco**

Os ensaios no estado fresco das argamassas moldadas foram os primeiros a serem conduzidos. As conclusões estão apresentadas de conformidade com o tipo de ensaio conduzido.

##### **5.1.1 Índice de Consistência**

Após a condução dos ensaios de índice de consistência, observou-se a existência de duas faixas distintas de comportamento: uma relativa ao traço piloto, e outra, denotando recuo na consistência, referente aos traços compósitos. Estes apresentaram consistência inicial e final sensivelmente menores que os valores observados para o TP. O recuo observado para a consistência dos traços compósitos está relacionado com a presença das partículas de madeira e sua estrutura celular, cheia de lacunas e vazios, que absorvem a água e sais dissolvidos pelo andamento da hidratação do cimento, reduzindo, por conseguinte a consistência e a

trabalhabilidade das argamassas compósitas. Tal premissa pode justificar o comportamento similar observado para os traços compósitos no que diz respeito ao recuo da consistência em comparação ao TP.

O traço M e o traço BT apresentaram o mesmo valor para a diferença entre consistência inicial e final, mas, comparando a consistência inicial e final dos traços BT e M, observa-se que o traço M apresenta valor indicativo de um traço mais fluido que o traço BT, o que, teoricamente, daria ao traço M uma melhor trabalhabilidade para moldagem em perfis, fôrmas, etc. Contudo, durante o programa experimental, especificamente na etapa das moldagens dos corpos de prova com os traços em questão, não foi observada diferença acentuada entre a fluidez do traço BT e M, porém, houve diferença notória entre a fluidez do traço M e traço SE, o que é corroborado pelos valores obtidos.

## **5.2 Conclusões dos ensaios no Estado Endurecido**

Através dos resultados obtidos após a condução dos ensaios das argamassas compósitas no estado endurecido, foi possível avaliar a dimensão da influência dos extrativos das partículas de madeira na resistência à compressão das argamassas compósitas. Da mesma forma, foi possível avaliar o desempenho dos tratamentos adotados com a função de mitigar os efeitos deletérios dos extrativos. As conclusões estão apresentadas de conformidade com o tipo de argamassa moldada.

### **5.2.1 Traço TP**

Os resultados obtidos para o traço piloto já eram esperados, onde o comportamento verificado no aumento de tensões de ruptura para o referido traço é bastante característico de argamassas de cimento-areia. O efeito do aditivo acelerador de pega é observado pelos valores de resistência à ruptura nas primeiras idades (01 dia), o que torna esta tipologia de argamassa produzida potencialmente atraente à indústria de peças e perfis pré-moldados, uma vez que bons níveis de resistência à ruptura nas primeiras idades aceleram a produção, pois que diminuem o tempo de permanência da peça, ou perfil, em moldes. Os valores observados para as tensões de ruptura aos 28 dias também não se mostraram diferentes do esperado.

### **5.2.2 Traço SE**

Os resultados verificados para o traço compósito SE corroboraram as expectativas da presente pesquisa. Observou-se que o efeito da adição de resíduos foi particularmente nocivo à resistência à compressão. Comparativamente ao traço TP, os valores obtidos para as primeiras idades foram bastante baixos, bem como para a idade de 28 dias, onde a média foi de 22.13 MPa. Conclui-se, portanto, que a secagem em estufa foi o tratamento que proporcionou os piores resultados dentre aqueles pesquisados. Relativo à viabilidade do tratamento, o mesmo não apresenta dificuldades de condução, seja pelo refino de técnica ou procedimentos específicos, porém, necessita de uma estufa para realização do respectivo tratamento.

Os efeitos negativos observados na resistência à compressão do compósito SE, além da avaliação à compressão ter sido realizada até 28 dias de idade, não proporcionam margem para maiores afirmações sobre o comportamento do compósito, entretanto, é possível apontar compósito SE como um material alternativo potencialmente utilizável pela construção civil, contribuindo para minimizar os impactos ambientais pelo uso dos resíduos de madeira. Junto com este potencial de uso, vem a possibilidade de redução do consumo de agregado miúdo pela substituição pelos resíduos de madeira, mitigando assim, os impactos ambientais ocasionados por estes resíduos.

O compósito do tipo SE apresenta relativa potencialidade de uso para a produção de peças decorativas, como perfis de rodapé, perfis de rodapê, almofadas de portas, tampos de mesa, balcões e demais peças e artefatos que não estejam submetidos a esforços acentuados quando em serviço. Segundo a média das tensões de ruptura observadas aos 28 dias, o traço SE também apresenta relativo potencial para utilização em argamassas de reboco, contrapisos, enchimentos e para a fabricação de bloquetes pré moldados para revestimento de pisos de baixo tráfego. Contudo, para ratificar tal uso, tornam-se necessários estudos mais específicos, como estudo de durabilidade e resistência à abrasão.

### **5.2.3 Traço BT**

O traço BT, comparativamente ao traço SE, apresentou resultados favoráveis sobre as tensões de ruptura. Verificou-se que o melhor desempenho em relação à resistência à compressão está diretamente ligado ao tipo de tratamento dos resíduos, uma vez que para os

traços compósitos, mantiveram-se constantes a quantidade de cimento, agregado, resíduo e aditivo, variando somente o tipo de tratamento adotado. Em comparação com o traço TP, o valor médio obtido para a resistência à compressão nas primeiras idades foi bastante satisfatório (13,23 MPa), situando-se na faixa de valor obtido para o traço TP (13,44 MPa), todavia, a média obtida para 28 dias de idade (25.63 MPa) foi bastante inferior ao TP (41 MPa).

Em comparação com o traço M, mesmo com ligeira diferença numérica observada para as médias dos valores de tensão de ruptura, a partir de 3 dias de idade, não há diferença estatística entre os resultados obtidos para o traço BT e M. Desta forma, a variável interveniente na escolha de um traço, em detrimento do outro, passa a ser o maior ou menor refino técnico no processo de execução do compósito, a maior ou menor facilidade de moldagem, ou, o maior ou menor custo de produção.

De posse dos resultados, conclui-se que possível apontar compósito BT como um material alternativo potencialmente utilizável pela construção civil, contribuindo para minimizar os impactos ambientais pelo uso dos resíduos de madeira. Junto com este potencial de uso, vem a possibilidade de redução do consumo de agregado miúdo pela substituição pelos resíduos de madeira, mitigando assim, os impactos ambientais ocasionados por estes resíduos.

O tratamento com banho térmico é bastante simples de ser realizado, não apresenta necessidade de equipamentos específicos, exceto uma estufa para procedimentos de secagem após o tratamento. Os valores obtidos para a resistência à compressão nas primeiras idades (24 horas) torna o traço BT potencialmente atrativo para uso na indústria de pré moldados, onde são necessários bons níveis de resistência nas referidas idades a fim de permitir maior sinergia no desmolde de peças e perfis. Apesar da avaliação à compressão ter sido realizada até 28 dias de idade, o que não permite de maiores afirmações sobre o comportamento do compósito, o traço também apresenta relativo potencial para fabricação de blocos de vedação, blocos para pavimentação de baixo tráfego, painéis divisórios e chapas para revestimento. O compósito apresenta ainda, relativo potencial para ser usado de maneira análoga ao concreto leve, contudo, para ratificar tais suposições, são necessários estudos mais específicos.

### 5.2.4 Traço M

A resistência à compressão do traço M nas primeiras idades (24 horas) foi superior ao traço TP (19.26 MPa e 13.44 MPa, respectivamente). Há indícios que o melhor comportamento da resistência à compressão do compósito seja decorrente da ação conjunta do aditivo acelerador e do sulfato de alumínio empregado na hidratação da matriz cimentante. O fato em questão necessita de estudos direcionados para corroborar os indícios observados.

De forma geral, o tratamento com mineralização mostrou-se mais eficiente que o tratamento de secagem em estufa, evidenciando o melhor desempenho dos compósitos preparados com os resíduos tratados com mineralização. Todavia, a despeito da sensível diferença entre o traço M e BT na idade de 01 dia, estatisticamente os resultados para as demais idades são equivalentes, fazendo com que a instância decisória para a adoção de um traço em detrimento do outro recaia sobre o refino de produção, facilidade de moldagem, e custos.

De posse dos resultados, conclui-se que possível apontar compósito M como um material alternativo potencialmente utilizável pela construção civil, contribuindo para minimizar os impactos ambientais pelo uso dos resíduos de madeira. Junto com este potencial de uso, vem a possibilidade de redução do consumo de agregado miúdo pela substituição pelos resíduos de madeira, mitigando assim, os impactos ambientais ocasionados por estes resíduos.

Relativo à viabilidade de condução do tratamento, o mesmo apresenta facilidade de condução, pois necessita de recipiente metálico e sulfato de alumínio para imersão dos resíduos, além de estufa para posterior procedimento de secagem. A despeito da avaliação à compressão ter sido realizada até 28 dias de idade, o que não permite de maiores afirmações sobre o comportamento do compósito, o mesmo apresenta relativa possibilidade de emprego na indústria de pré-moldados, principalmente para a produção de blocos e painéis de vedação, blocos para pavimentação e chapas para revestimentos. O compósito apresenta ainda, relativo potencial para ser usado de maneira análoga ao concreto leve, contudo, para ratificar tal suposição, necessita de estudos mais específicos.

### 5.3 Sugestões para pesquisas futuras

O compósito cimento-madeira confeccionado com resíduos de madeira (pó-de-serra e maravalha) apresenta potencial para ser absorvido como material de uso da Indústria da Construção Civil. A Amazônia, em sendo região onde o extrativismo vegetal ainda é parcela considerável de geração de divisas econômicas, apresenta problemas inerentes a esta atividade, como a intensa depredação da floresta, bem como a inadequação dos destinos dados aos resíduos e rejeitos de produção, o que também ocasiona graves impactos ambientais.

Ao contrário do que acontece em outras regiões, particularmente Sudeste e Centro-Oeste, onde tais resíduos servem de matéria-prima base para produção de artefatos como briquetes de cimento-madeira, chapas, blocos de vedação e revestimento, a região Amazônica ainda carece de estudos mais amplos visando o reaproveitamento dos resíduos e rejeitos gerados pela indústria madeireira.

Como complemento da presente pesquisa, sugere-se a realização dos seguintes estudos:

- a) Análise de custos do tratamento dos resíduos de serraria para a produção de compósitos cimento-madeira;
- b) Verificação do índice de inibição das espécies botânicas utilizadas no presente trabalho;
- c) Fabricação de compósito cimento-madeira utilizando uma única espécie vegetal, preferencialmente, as que apresentem maior utilização em serrarias e correlatos e que, conseqüentemente, proporcionam maior geração de resíduos;
- d) Ensaios de resistência à abrasão, absorção e durabilidade por exposição ao tempo;

- e) Influência no comportamento à compressão do compósito com matrizes cimentantes de baixa alcalinidade;
  
- f) Influência no comportamento à compressão do compósito com cimentos de alta resistência inicial;
  
- g) Verificar o potencial de lixiviação e liberação para o meio ambiente do sulfato de alumínio utilizado na mineralização, bem como o potencial ataque do sulfato em armaduras.



## **Referências Bibliográficas:**

AGOPYAN, V.; SAVASTANO JUNIOR, H. Microestrutura x desempenho dos compósitos reforçados com fibras vegetais. In: WORKSHOP RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL, 1996, **Anais do Workshop Reciclagem e reutilização de Resíduos como Materiais de Construção Civil**. São Paulo, 1996, p. 153-158.

AGOPYAN, V., SAVASTANO JUNIOR, H. Fibras naturais para a produção de componentes construtivos. In III SIMPÓSIO IBERO-AMERICANO DE TELHADOS PARA HABITAÇÃO, 1998, **Anais do III Simpósio Ibero-Americano de telhados para habitação**, 1998, p. 11-59.

AGOPYAN, VAHAN; JOHN, VANDERLEY.M. Reciclagem de resíduos da construção. In: Seminário Reciclagem de Resíduos sólidos domiciliares, 1999. **Anais do Seminário Reciclagem de Resíduos sólidos domiciliares**, 1999. pg.02-13.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 1978.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7251**: Agregados em estado solto: determinação da massa unitária – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7211**: Agregado para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5734**: Peneiras para ensaio com telas de tecido metálico-método de ensaio. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7217**: Composição Granulométrica dos Agregados, ABNT, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 9776**: Agregados: determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapmann. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7220**: Agregados: determinação de impurezas orgânicas húmicas em agregado miúdo-método de ensaio. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS –. **NBR 6467**: Agregado miúdo para concretos: determinação do inchamento-método de ensaio. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 11578**: Cimento Portland Composto - Especificação. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 11768 (EB-1763/92)**: Aditivos para concreto de cimento Portland. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7222**: Argamassa e concreto: determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos - método de ensaio. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7215**: Cimento Portland: determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

BARATA, M. S. **Concreto de alto desempenho no Estado do Pará**: estudo de viabilidade técnica e econômica de produção do CAD com materiais disponíveis em Belém, através do emprego de adição de sílica ativa e metacaulim. Porto Alegre, 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

BARROSO, G. M. **Sistemática de Angiospermas do Brasil**. São Paulo: EDUSP, 1978.

BAUER, L. A. F (1987). **Materiais de construção**. 3ª ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1987. v. 1.

BERALDO, A. L. *et al.* Viabilidade de fabricação de compósitos rejeitos de madeiras e cimento Portland (CBC). In: WORKSHOP RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE REJEITOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL, 1996, **Anais do Workshop reciclagem e reutilização de rejeitos como materiais de construção civil**. São Paulo, 1996. p. 77-82.

BERALDO, A. L. *et al.* Compósitos à base de resíduos vegetais e cimento Portland. In: VIII ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 2002, **Anais do VIII Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira**. Uberlândia, 2002 (1 CD-ROM).

BLANKS, R. F; KENNEDY, H. L. **The Technology of Cement and Concrete**. New York: J. Willey, 1955. v. I e v.II.

BOGUE, Robert Herman. **La química del cemento Portland**. Madrid: Dossat, 1952.

BOUGUERRA, A. *et al.* Effect of microstructure on the mechanical and thermal properties of lightweight concrete prepared from clay, cement, and wood aggregates. **Cement and Concrete Research**, v. 28, n. 8, p. 1179–1190, 1998. Elsevier Science Ltd.

CABANGON, RICO J. *et al.* Effect of post-harvest storage on the suitability of *Acacia mangium* for the manufacture of wood-wool cement boards. In: WOOD-CEMENT COMPOSITES IN THE ASIA-PACIFIC REGION, 2000. **Anais do Wood-Cement Composites in the Asia-Pacific Region**. Australia, 2000. p. 97-104.

CAMPOS, C. I. de; BERALDO, A. L. HELLMEISTER, J. C. Caracterização mecânica de compósito cimento-madeira de reflorestamento (*Cunninghamia lanceolata Hook*). In: VII ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 2000, **Anais do VII Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira**, 2000 (1 CD-ROM).

CARNEIRO, Arnaldo Manoel Pereira. **Contribuição ao estudo da influência do agregado nas propriedades de argamassas compostas a partir de curvas granulométricas**. São Paulo, 1999. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

CARRAZZONI, E. P. **Revisão sobre a biogênese dos terpenos**. Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 1966.

CLEMONS, C. M.; CAULFIELD, D. F.; GIACOMIN, A. J. Dynamic Fracture Toughness of Cellulose- Fiber-Reinforced Polypropylene: preliminary investigation of microstructural effects. **Journal of elastomers and plastics**, v. 31, 1999.

CZERNIN, W. **Cement Chemistry and Physics for Civil Engineers**. London: Crosby Lockwood, s/d.

DAL MOLIN, D. C. C; SILVEIRA, A. A.; FERREIRA, A. A. A. Cinza da casca de arroz como adição mineral. In: WORKSHOP RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE REJEITOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL, 1996, **Anais do Workshop reciclagem e reutilização de rejeitos como materiais de construção civil**. São Paulo, 1996. p. 39-44.

EAMES, A. J. **Morphology of the Angiosperms**. New York: McGraw-Hill, 1961.

ENGLISH, B., YOUNGQUIST, J.A., KRZYSIK, A.M., **Lignocellulosic Composites: cellulosic polymers, blends and composites**, New York: Ed. Hanser Publishers, 1994.

FERRANTE, M.; SANTOS, M; CASTRO, F. R DE. Materials Selection as an interdisciplinary technical activity: basic methodology and case studies. **Materials Research**, v. 3, n. 2, p. 1-9, 2000.

FONSECA, FÁBIO DE OLIVEIRA, LIMA, ALEXANDRE MARTINS DE. Compósito cimento-madeira com resíduos provenientes da indústria madeireira da região amazônica. In: VIII ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 2002, **Anais do VIII Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira**. Uberlândia, 2002 (1 CD-ROM).

GHAVAMI, K., TOLEDO FILHO, R., BARBOSA, N. P. Behavior of composite soil reinforced with natural fibers. **Cement and concrete composites**, n. 21, p. 39-48, 1999. Elsevier Science Ltd.

GLASSER, W.; SARKANEN, S. **Lignin Properties and Materials**. Washington: American Chemical Society, 1989.

GRANDI, Luis Alfredo Cotini. **Placas pré-moldadas de argamassa de cimento e pó de serra**. Campinas, 1995. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas.

HAGE JUNIOR, M. Propriedades mecânicas e dinâmicas de compósitos com fibras vegetais. 1990.

HAMASSAKI, L. T. *et al.* Uso de entulho como agregado para argamassas de alvenaria. In: WORKSHOP RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE REJEITOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL, 1996, **Anais do Workshop reciclagem e reutilização de rejeitos como materiais de construção civil**. São Paulo, 1996. p. 107-115.

HULL, D and CLYNE, T. W. **An introduction to composite materials**. 2ª ed. New York: Cambridge University Press, 1996.

ISAIA, Geraldo Cechella. Entraves e perspectivas para uso de elevados teores de cinza volante e cinza de casca de arroz em concreto estrutural. In: WORKSHOP RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE REJEITOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL, 1996, **Anais do Workshop reciclagem e reutilização de rejeitos como materiais de construção civil**. São Paulo, 1996. p. 45-50.

IWAKIRI, S; LATORRACA, J. V. F. Efeito da cura a vapor sobre as propriedades mecânicas de painéis de cimento-madeira. **Floresta e Ambiente**, v.8, n. 1, p. 84-93, 2001.

JOHN, V. M. Pesquisa e desenvolvimento de mercado para resíduos. In: WORKSHOP RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE REJEITOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL, 1996, **Anais do Workshop reciclagem e reutilização de rejeitos como materiais de construção civil**. São Paulo, 1996. p. 21-30.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na Construção Civil**: Contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento. São Paulo, 2000. 113p. Tese (Livre Docência). Departamento de Engenharia de Construção Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

JOHN, V. M. **Desenvolvimento sustentável, construção civil, reciclagem e trabalho multidisciplinar**. Disponível em: < [http://www.reciclagem.pcc.usp.br/des\\_sustentavel.html](http://www.reciclagem.pcc.usp.br/des_sustentavel.html)> Acesso em 14 mar. 2002.

JOHNSTON, D. **La madera-clases y características**. Barcelona: Ediciones Ceac, 1989.

KRZYSIK, A. *et al.* Composites from recycled wood and plastics. In: Wood–Cement Composites in the Asia–Pacific Region, 2000, **Anais do Wood–Cement Composites in the Asia–Pacific Region**. Canberra, 2000.

KAWAY, SHUICHI *et al.* Manufacture of cement-bonded boards from wood and other lignocellulosic materials: relationship between cement hydration and mechanical properties of cement-bonded boards. In: WOOD-CEMENT COMPOSITES IN THE ASIA-

PACIFIC REGION, 2000. **Anais do Wood-Cement Composites in the Asia-Pacific Region**. Australia, 2000. p. 13-23.

LATORRACA, J. V. F. ***Eucalyptus spp* na produção de painéis de cimento – madeira**. Curitiba, 2000. Tese (Doutorado). Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

LATORRACA, João Vicente de Figueiredo. Estudo comparativo entre dois métodos utilizados na avaliação da aptidão da madeira para uso em chapas de cimento-madeira. In: VIII ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 2002, **Anais do VIII Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, 2002** (1 CD-ROM).

LEÃO, A. *et al.* Property enhancement of wood composites using gas injection. In: 28<sup>th</sup> Washington State University international particleboard/composite materials symposium, 1994. **Anais do 28<sup>th</sup> Washington State University international particleboard/composite materials symposium**. Washington State, 1994. p. 243-259.

LEDHEM, R. M. DHEILLY, M. QUENEUEDEC. **Reuse of waste oils in the treatment of wood aggregates**. France, 1999.

LEVY, S. M.; HELENE P. R. L. Propriedades mecânicas de argamassas produzidas com entulho de Construção Civil. In: WORKSHOP RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE REJEITOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL, 1996, **Anais do Workshop reciclagem e reutilização de rejeitos como materiais de construção civil**. São Paulo, 1996. p. 137-146.

LIMA, Alexandre Martins de. **Madeiras, características, preservação e aplicações na Construção Civil**. Seminário. Semana do Tecnológico. Universidade Federal do Pará. 2001.

LIMA, Alexandre Martins de *et al.* Compósito cimento-madeira com resíduos provenientes da indústria madeireira da Região Amazônica. In: VIII ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 2002, **Anais do VIII Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira**. Uberlândia, 2002 (1 CD-ROM).

LOUREIRO, A. A.; SILVA, M. F.da. **Catálogo de madeiras da Amazônia**. Belém: SUDAM, 1968. v. 1.

MAGALHÃES, M. N.; LIMA, A. C. P. **Noções de Probabilidade e Estatística**. 4 ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2002.

MARQUES, Saviniano de Castro. **Contribuição ao estudo da extração do tanino da Acácia Negra em dornas e à pressão atmosférica**. Porto Alegre, 1950. Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MATTOS, L. R. S. **Identificação e caracterização das argamassas para revestimento externo utilizadas na cidade de Belém-PA**. Porto Alegre, 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MEHTA, P. K. MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994.

MEYERS, GEORGE E. Composites from recycled wood and plastics. USDA Forest Service. Forest Products Laboratory, Madison, 1994.

NEVILLE, A. **Propriedades do concreto**. 2<sup>a</sup>. ed. São Paulo: Pini, 1997.

PERA, J. State of art report-use of waste materials in construction in western Europe. In: WORKSHOP RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE REJEITOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL, 1996, **Anais do Workshop reciclagem e reutilização de rejeitos como materiais de construção civil**. São Paulo, 1996. p. 01-20.



PILATO, L. A., MICHNO, M. J. **Advanced composite materials**. Berlin Heidelberg:pringer –Verlag, 1994.

PIMENTEL, L.; BERALDO, A. L. Utilização de resíduos de *pinus caribaea* na produção de compósito Madeira-cimento. In: VII ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 2000, **Anais do VII Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira**, 2000 (1 CD-ROM).

PRUDÊNCIO JUNIOR, L. R., SANTOS, S. Influência do grau de moagem na pozolanicidade da cinza da casca de arroz. In: WORKSHOP RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE REJEITOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL, 1996, **Anais do Workshop reciclagem e reutilização de rejeitos como materiais de construção civil**. São Paulo, 1996. p. 51-60.

RAMACHANDRAN, V. S, PHIL, D. **Application of differential thermal analysis in cement chemistry**. New York: Chemical Publishing Company, 1969.

SARMIENTO, C. S. R.; FREIRE, W. J. Tratamentos aplicado ao bagaço de cana – de – açúcar visando sua utilização para fins de material de construção. In: WORKSHOP RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE REJEITOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL, 1996, **Anais do Workshop reciclagem e reutilização de rejeitos como materiais de construção civil**. São Paulo, 1996. p. 131-136.

SAVASTANO JUNIOR, H. **Zona de transição entre fibras e pasta de cimento Portland**: caracterização e inter-relação com as propriedades mecânicas do compósito. São Paulo, 1992. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

SAVASTANO JUNIOR, H., DANTAS, F. A. S.; AGOPYAN, V. **Materiais reforçados com fibras**: correlação entre a zona de transição fibra matriz e propriedades mecânicas. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1994.

SAVASTANO JUNIOR, H. **Materiais à base de cimento reforçados com fibra vegetal**: reciclagem de rejeitos para a construção de baixo custo. São Paulo, 2000. Tese (Livre Docência). Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

SCHUBERT, W. J. **Lignin and biochemistry**. New York: Academic, 1965.

SILVA, A B. da. **Lignosulfonatos e suas aplicações em concreto**. Instituto Brasileiro do Concreto, n. 1, p. 44-48, 1991.

SIMATUPANG, M.H. *et al.* Investigations on the influence of addition of carbon dioxide on the production and properties of rapidly set wood-cement composite. Cement and concrete composites. n. 17, p. 187-197. Elsevier Science Ltd. 1995.

SUKARTANA *et al.* Resistance of Wood- and Bamboo-Cement Boards to subterranean termite *Coptotermes gestroi* Wasmann (Isoptera: Rhinotermitidae). In: WOOD-CEMENT COMPOSITES IN THE ASIA-PACIFIC REGION, 2000. **Anais do Wood-Cement Composites in the Asia-Pacific Region**. Australia, 2000. p. 62-65.

SOUZA, J. M. C. **Materiais Compósitos**. Lisboa, 2003. Monografia (Graduação). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

TAYLOR, H. F. W. **The chemistry of cements**. London: Academic Press, 1964. v.1

TRUGILHO, P.F *et al.* Efeito do tratamento com água quente na saturação da madeira para determinação da sua contração volumétrica. In: VII ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 2000, **Anais do VII Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira**, 2000 (1 CD-ROM).

TRUGILHO, P.F *et al.* Comparação entre dois métodos para estimação da umidade de equilíbrio em madeiras. In: VII ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 2000, **Anais do VII Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira**, 2000 (1 CD-ROM).

UHL, C.; BUSCHBACHER, R. Queimada: o corte que atrai. **Revista Ciência Hoje Especial Amazônia**. Rio de Janeiro, p. 85-88, 1991.

UHL, C. *et al.* Seleção Predatória. **Revista Ciência Hoje Especial Amazônia**. Rio de Janeiro, p. 108-115, 1991.

VALENZUELA, W. (1991). **Contribution a la determination de l'aptitud d'essences forestieres pour la fabrication de panneaux de fibro-ciment**. Gembloux, 1989. Faculté des Sciences Agronomiques.

WARDEN, P. G.; SAVASTANO, H; COUTSS, R. S. P. Brazilian waste Fibres as reinforcement for cement-based composites. **Cement and concrete composites**, n. 22, p. 379-384, 2000. Elsevier Science Ltd.

WARDEN, P. G.; SAVASTANO JUNIOR, H; COUTSS, R. S. P. Ground iron blast furnace slag as matrix for cellulose-cement materials. **Cement and concrete composites**, n. 23. 2001. Elsevier Science Ltd.

WOLFE, RONALD W., GJINOLLI, AGRON. Durability and strength of cement-bonded wood particle composites made from construction waste. **Forest products journal**, n. 49. 1999. Forest Product Laboratory. p. 24-31.

YOUNGS, R. L.; YOUNGQUIST, J. A. Timber and wood composites for the next century. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EFFECTIVE UTILIZATION OF PLANTATION TIMBER, 1999, Anais do International conference on effective utilization of plantation timber. Taiwan, 1999. pp. 627-632.

# **ANEXOS**



CIMENTO POTY S/A - UNIDADE SOBRAL  
 CONTROLE DA QUALIDADE  
 BOLETIM DE ANÁLISES DE CIMENTO Nº 06204

CPII-Z-32 RS (NBR 11578/Jul.91)  
**ENSACADO**  
 Junho-04  
 Certificada pela NBR ISO 9001:2000



**ENSAIOS QUÍMICOS**

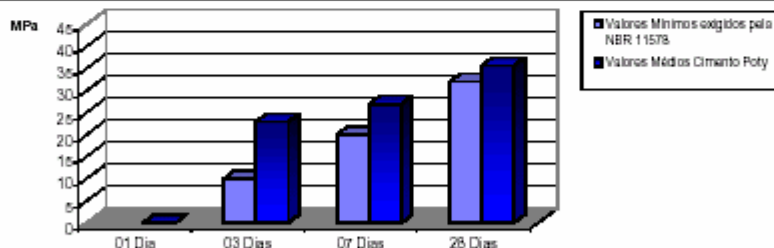
ENSAIO	NBR Nº	UNIDADE	RESULTADOS	ESPECIFICAÇÃO NORMA NBR 11578/91
Perda ao Fogo - PF	5743/89	%	5,70	≤ 6,5
Óxido de Magnésio - MgO	9203/85	%	3,18	≤ 6,5
Anidrido Sulfúrico - SO <sub>3</sub>	5745/89	%	2,95	≤ 4,0
Resíduo Insolúvel - RI	8347/92	%	11,51	≤ 16,0
Equivalente Alcalino em Na <sub>2</sub> O - (0,658 x K <sub>2</sub> O% + Na <sub>2</sub> O%)	-	%	0,89	não aplicável
Óxido de Cálcio Livre - CaO(Livre)	7227/90	%	1,14	não aplicável

**ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICOS**

ENSAIO	NBR Nº	UNIDADE	RESULTADOS	ESPECIFICAÇÃO NORMA NBR 11578/91
Área Específica (Blaine)	7224/96	cm <sup>2</sup> /g	4035	≥ 2800
Massa Específica	6474/84	g/cm <sup>3</sup>	3,00	não aplicável
Densidade Aparente	-	g/cm <sup>3</sup>	1,1	-
Finura - Resíduo na Peneira de 0,075mm (#200)	11579/91	%	2,5	≤ 12,0
Finura - Resíduo na Peneira de 0,044mm (#325)	11579/91	%	12,7	não aplicável
Água da Pasta de Consistência Normal	11580/91	%	26,4	não aplicável
Início de Pega	11581/91	h:min	4:01	≥ 1
Fim de Pega	11581/91	h:min	4:54	≤ 10 (facultativo)
Expansibilidade de Le Chatelier - a Quente	11582/91	mm	0,32	≤ 5

**RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa) - NBR 7215/91**

Idade (dias)	Min.	Máx.	Média	Desvio	ESPECIFICAÇÃO NORMA NBR - 11578/91
1	-	-	-	-	não aplicável
3	21,7	24,0	23,0	0,71	≥ 10,0
7	26,5	28,3	27,0	0,47	≥ 20,0
28	34,5	36,3	35,7	0,63	≥ 32,0



**Observações:**

Como visto acima todas as análises realizadas atenderam os valores especificados pela norma NBR 11578/Jul.91, pode-se considerar portanto que o produto a qual este laudo faz referência está apto ao consumo.

\* Resistência à Compressão R28d (MPa) - dados até o dia 10-06-04

Jose Olimpio de Paiva Neto  
 Coord. Controle de Qualidade

Anderson Bastos Alves  
 Coord. Desenvolvimento Técnico

Atualizado em: 09-07-04

**ANEXO B - Boletim de Análises de Cimento – Ensaios Químicos, Ensaios Físicos e Mecânicos, Ensaio de Resistência à Compressão.**

CIMENTO POTY S/A - UNIDADE SOBRAL CONTROLE DA QUALIDADE							CPII-Z-32 RS (NBR 11578/Jul.91) <b>ENSACADO</b> Junho-04 Certificada pela NBR ISO 9001:2000					CIMENTO <b>POTY</b>							
BOLETIM DE ANÁLISES DE CIMENTO N° 060/04																			
DATA DA COLETA	ENSAIOS QUÍMICOS						ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICOS												
	PF	MgO	SO3	Eq. Alcalino	RI	CaO Livre	Resistência Compressão (MPa)				Finura (%)		Blaine	Água de Consistência (%)	Tempo Pegajoso (min)		Exp. Quanto		
Límites de Norma	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 4,0	Não Aplicável	≤ 16,0	Não Aplicável	1 Dia	3 Dias	7 Dias	28 Dias	#200	#325	cm2/g	Não Aplicável	≥ 2600	Não Aplicável	≥ 1	≤ 10	≤ 5,0
#####	5,85	3,15	2,86	0,87	12,31	1,1	-	22,9	27,7	36,1	3,1	12,0	4050	25,9	3:45	4:40	0,00		
#####	5,66	3,11	2,91	0,90	11,59	1,5	-	23,7	27,6	35,6	3,0	12,8	4040	26,5	3:35	4:30	0,00		
#####	5,87	3,15	2,97	0,89	11,01	0,9	-	23,9	26,8	36,2	3,3	13,0	4150	27,0	4:10	5:00	0,00		
#####	6,28	3,15	3,10	0,90	11,12	0,9	-	23,3	27,3	35,8	2,3	12,6	4170	26,3	3:50	4:50	0,00		
#####	5,87	3,14	2,98	0,89	10,68	1,2	-	24,0	28,3	36,2	2,4	12,8	3990	25,9	3:55	4:50	0,50		
#####	5,89	3,13	2,95	0,87	13,00	1,1	-	23,4	26,9	35,9	1,8	12,0	3980	26,0	4:15	5:05	0,50		
#####	5,76	3,18	3,02	0,90	10,22	0,7	-	24,0	27,6	36,3	2,0	11,8	3960	26,0	4:10	5:00	0,00		
#####	5,85	3,13	3,01	0,87	12,75	1,2	-	22,9	26,9	35,6	2,4	12,6	4080	26,0	4:15	5:10	0,50		
#####	5,54	3,19	3,10	0,88	8,95	0,9	-	22,2	27,0	34,7	2,6	14,3	3920	26,2	4:10	5:00	0,00		
#####	6,08	3,16	2,89	0,84	11,79	1,3	-	21,8	26,8	34,5	2,2	13,1	3990	26,3	3:40	4:35	0,50		
#####	5,60	3,24	3,04	0,89	10,78	1,1	-	22,6	26,8	-	2,1	12,0	3940	26,3	3:50	4:45	0,50		
#####	5,98	3,17	2,97	0,89	11,05	0,9	-	22,8	26,8	-	2,0	11,9	4110	26,3	4:05	4:55	0,50		
#####	5,35	3,20	2,87	0,91	12,72	1,0	-	22,5	26,6	-	2,4	11,9	3970	26,1	4:15	5:05	0,50		
#####	5,84	3,17	2,85	0,86	12,98	1,1	-	22,4	26,8	-	2,6	14,3	4000	26,4	4:10	5:00	0,50		
#####	5,72	3,17	2,92	0,87	11,89	1,3	-	22,4	26,8	-	2,3	13,3	4050	26,3	4:00	4:55	0,50		
#####	5,84	3,23	2,95	0,87	11,92	1,3	-	21,9	26,5	-	2,2	12,6	4160	27,5	4:05	5:00	0,50		
#####	5,63	3,20	3,02	0,82	12,23	1,7	-	21,7	26,5	-	2,3	14,2	3990	26,4	4:10	5:05	0,00		
#####	5,42	3,19	2,90	0,87	10,48	1,3	-	23,9	26,6	-	3,0	12,2	3920	26,4	4:05	5:00	0,50		
#####	5,53	3,24	3,07	0,93	9,11	1,1	-	24,0	28,1	-	3,2	12,3	4040	26,6	3:45	4:35	0,50		
#####	5,41	3,27	2,89	0,90	10,02	1,2	-	23,4	26,5	-	3,2	12,7	4090	26,8	3:50	4:45	0,50		
#####	5,63	3,32	3,06	0,89	11,16	1,4	-	23,5	27,2	-	3,0	12,6	4040	26,7	3:50	4:50	0,00		
#####	5,78	3,15	3,00	0,91	11,22	1,3	-	22,1	27,0	-	2,4	12,6	4170	26,6	3:55	4:55	0,50		
#####	5,72	3,13	2,86	0,90	12,89	1,2	-	22,2	26,7	-	2,8	12,8	4090	27,3	4:10	5:05	0,50		
#####	5,95	3,07	2,92	0,88	12,09	1,2	-	22,6	26,9	-	2,3	12,3	4130	26,4	4:05	5:00	0,00		
#####	5,40	3,10	2,88	0,90	11,66	1,1	-	23,2	26,7	-	2,3	13,0	4090	26,5	4:15	5:05	0,50		
#####	5,68	3,08	2,96	0,89	12,77	0,9	-	22,6	26,8	-	2,2	12,4	4060	26,2	4:15	5:05	0,00		
#####	5,33	3,08	2,90	0,93	11,98	1,1	-	23,5	27,5	-	2,2	12,2	3840	26,1	4:10	5:00	0,00		
#####	5,38	3,16	2,87	0,92	12,25	0,9	-	23,2	26,6	-	2,0	13,1	3890	26,1	4:15	5:10	0,50		
#####	5,59	3,16	2,95	0,91	11,75	1,0	-	23,6	27,2	-	2,5	12,4	4120	26,1	4:00	4:55	0,50		
#####	5,59	3,47	2,89	0,89	10,91	1,4	-	22,4	26,7	-	3,6	13,5	4020	25,9	3:35	4:25	0,50		
Media	5,70	3,18	2,95	0,89	11,51	1,1	-	23,0	27,0	35,7	2,5	12,7	4035	26,4	4:01	4:54	0,32		
D. Padrão	0,23	0,08	0,07	0,02	1,07	0,22	-	0,71	0,47	0,6	0,5	0,7	86,0	0,39	0,21	0,20	0,25		
Coef. Var.	4,03	2,52	2,37	2,25	9,30	19,26	-	3,09	1,74	1,8	18,2	5,4	2,1	1,48	125,48	97,79	78,95		
Mínimo	5,33	3,07	2,85	0,82	8,95	0,73	-	21,7	26,5	34,5	1,8	11,8	3840	25,9	3:35	4:25	0,00		
Máximo	6,28	3,47	3,10	0,93	13,00	1,74	-	24,0	28,3	36,3	3,6	14,3	4170	27,5	4:15	5:10	0,50		

**Resistência à Compressão (MPa)**

**MPa**

Observações:  
Como visto acima todas as análises realizadas atenderam os valores especificados pela norma NBR 11578/Jul.91, pode-se considerar portanto que o produto a qual este laudo faz referência está apto ao consumo.

*R. Olimp*  
José Olimp de Paiva Neto  
Coord. Controle de Qualidade

*R. R. Alves*  
Márcio Roberto Alves  
Coord. Desenv. Cimento Técnico

Atualizado em: 09-07-04





ANEXO C - Análise Físico-química de água subterrânea e efluentes.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
DIVISÃO DE CONTROLE AMBIENTAL

RESULTADO DE ANÁLISE

**SOLICITANTE**

NOME: Alexandre Lima  
ENDEREÇO: Rua Caripunas 1717 aptº 203  
CIDADE: Belém - PA  
FONE: 212 3835 CEP:66033-000  
E-MAIL: alexandrelima@unama.br  
CGC/CNPJ/CPF: 55.973.782-49


**INFORMAÇÕES DAS AMOSTRAS**

DATA DA COLETA: 11/08/2004  
DATA DA ENTRADA: 11/08/2004  
Amostra: Água Subterrânea/Efluente  
COLETA: as amostras foram coletadas pelo  
solicitante.

ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA			
RESULTADOS			
Parâmetros	Torneira do Laboratório de materiais no LMC 0817	Efluente gerado pelo aquecimento da água com resíduo de madeira 0818	Unidade
Alcalinidade Total	154,1	81,2	mg/L CaO <sub>3</sub>
Óleos e Graxas	-	22,40	mg/L
pH	7,8	6,5	-

**CONCLUSÃO: \*\*\*\*\***

Belém, 16 de agosto de 2004.

  
Profª Samira Maria Leão de Carvalho  
Coordenadora da DICA

Rua Augusto Corrêa, 1 (Campus Universitário) TE-LEQ-DICA CEP: 66075-900  
(091) 9964 2311/3183 1293/3183 1295 - Fax: (091) 211 1291 Belém PA - Brasil

**ANEXO D - Resultados dos Ensaios de resistência à compressão para os traços moldados**

Idades	Traço Piloto - TP		Traço seco em estufa SE		Traço com banho térmico BT		Traço com mineralização M	
	Traço 1:2 c/ aditivo		Traço 1:2 c/ aditivo e adição de madeira a 2,5%		Traço 1:2 c/ aditivo e adição de madeira a 2,5%		Traço 1:2 c/ aditivo e adição de madeira a 2,5%	
	identificação	Resist. (MPa)	identificação	Resist. (MPa)	identificação	resist	identificação	Resist. (MP)
24 horas	TP01	13,31	TP25	6,02	TP49	13,42	TP73	20,67
	TP02	15,1	TP26	3,7	TP50	14,32	TP74	17,61
	TP03	12,34	TP27	6,13	TP51	12,94	TP75	18,1
	TP04	13,01	TP28	4,79	TP52	12,23	TP76	20,67
3 dias	TP05	24,9	TP29	10,47	TP53	19,49	TP77	20,38
	TP06	25,42	TP30	10,55	TP54	17,35	TP78	25,31
	TP07	26,88	TP31	11,42	TP55	19,83	TP79	19,96
	TP08	28,72	TP32	11,82	TP56	17,87	TP80	18,73
7 dias	TP09	28,41	TP33	14,24	TP57	19,96	TP81	23,46
	TP10	37,59	TP34	14,47	TP58	20,15	TP82	22,48
	TP11	37,01	TP35	16,08	TP59	24,08	TP83	24,15
	TP12	37,12	TP36	12,64	TP60	20,75	TP84	21,84
14 dias	TP13	44,49	TP37	15,87	TP61	21,4	TP85	25,59
	TP14	39,52	TP38	17,09	TP62	23,54	TP86	26,26
	TP15	30,1	TP39	17,21	TP63	24,15	TP87	26,28
	TP16	39,56	TP40	16,03	TP64	26,43	TP88	25,45
21 dias	TP17	39,07	TP41	19,27	TP65	26,48	TP89	26,23
	TP18	40,04	TP42	19,54	TP66	26,18	TP90	27,9
	TP19	40,68	TP43	19,67	TP67	24,94	TP91	27,51
	TP20	43,14	TP44	22,01	TP68	23,2	TP92	27,52
28 dias	TP21	40,28	TP45	23,61	TP69	26,18	TP93	27,61
	TP22	39,26	TP46	21,62	TP70	25,84	TP94	29,45
	TP23	44,45	TP47	22,49	TP71	23,95	TP95	27,32
	TP24	39,99	TP48	20,81	TP72	26,53	TP96	26,28

## ANEXO E - Estatística descritiva para os traços moldados

### Traço TP

Estatística Descritiva para os Traços Moldados						
Dado estatístico	Traço /Idade					
	TP - 01 dia idade	TP - 03 dias idade	TP - 07 dias idade	TP - 14 dias idade	TP - 21 dias idade	TP - 28 dias idade
Média	13,44	26,48	40,73	38,42	40,73	41
Erro padrão	0,59	0,86	0,87	3,01	0,87	1,17
Mediana	13,16	26,15	40,36	39,54	40,36	40,14
Modo	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
Desvio padrão	1,18	1,71	1,74	6,02	1,74	2,34
Variância da amostra	1,39	2,93	3,01	36,19	3,01	5,49
Curtose	2,21	-0,83	1,71	2,15	1,71	3,41
Assimetria	1,29	0,82	1,15	-1,07	1,15	1,8
Intervalo	2,76	3,82	4,07	14,39	4,07	5,19
Mínimo	12,34	24,9	39,07	30,1	39,07	39,26
Máximo	15,1	28,72	43,14	44,49	43,14	44,45
Soma	53,76	105,92	162,93	153,67	162,93	163,98
Contagem	4	4	4	4	4	4
Maior(1)	15,1	28,72	43,14	44,49	43,14	44,45
Menor(1)	12,34	24,9	39,07	30,1	39,07	39,26
Nível de confiança(95,0%)	1,88	2,72	2,76	9,57	2,76	3,73

### TRAÇO SE

Estatística Descritiva para os Traços Moldados						
Dado estatístico	Traço /Idade					
	SE - 01 dia idade	SE - 03 dias idade	SE - 07 dias idade	SE - 14 dias idade	SE - 21 dias idade	SE - 28 dias idade
Média	5,16	11,07	14,36	16,55	20,12	22,13
Erro padrão	0,57	0,33	0,7	0,35	0,63	0,6
Mediana	5,41	10,99	14,36	16,56	19,61	22,06
Modo	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
Desvio padrão	1,15	0,66	1,41	0,7	1,27	1,2
Variância da amostra	1,32	0,44	1,98	0,49	1,61	1,44
Curtose	-1,97	-4,2	1,37	-5,59	3,68	-0,8
Assimetria	-0,71	0,29	0,01	-0,02	1,9	0,32
Intervalo	2,43	1,35	3,44	1,34	2,74	2,8
Mínimo	3,7	10,47	12,64	15,87	19,27	20,81
Máximo	6,13	11,82	16,08	17,21	22,01	23,61
Soma	20,64	44,26	57,43	66,2	80,49	88,53
Contagem	4	4	4	4	4	4
Maior(1)	6,13	11,82	16,08	17,21	22,01	23,61
Menor(1)	3,7	10,47	12,64	15,87	19,27	20,81
Nível de confiança(95,0%)	1,83	1,05	2,24	1,11	2,02	1,91

### TRAÇO BT

Estatística Descritiva para os Traços Moldados						
Dado estatístico	Traço /Idade					
	BT - 01 dia idade	BT - 03 dias idade	BT - 07 dias idade	BT - 14 dias idade	BT - 21 dias idade	BT - 28 dias idade
Média	13,23	18,64	23,88	21,24	25,2	25,63
Erro padrão	0,44	0,61	1,03	0,96	0,75	0,58
Mediana	13,18	18,68	23,85	20,45	25,56	26,01
Modo	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
Desvio padrão	0,88	1,21	2,07	1,93	1,49	1,15
Variância da amostra	0,77	1,47	4,28	3,71	2,22	1,33
Curtose	0,14	-4,74	1,08	3,35	-0,26	2,87
Assimetria	0,29	-0,09	0,1	1,82	-1	-1,65
Intervalo	2,09	2,48	5,03	4,12	3,28	2,58
Mínimo	12,23	17,35	21,4	19,96	23,2	23,95
Máximo	14,32	19,83	26,43	24,08	26,48	26,53
Soma	52,91	74,54	95,52	84,94	100,8	102,5
Contagem	4	4	4	4	4	4
Maior(1)	14,32	19,83	26,43	24,08	26,48	26,53
Menor(1)	12,23	17,35	21,4	19,96	23,2	23,95
Nível de confiança(95,0%)	1,4	1,93	3,29	3,07	2,37	1,83

## TRAÇO M

Estatística Descritiva para os Traços Moldados						
Dado estatístico	Traço /Idade					
	M - 01 dia idade	M - 03 dias idade	M - 07 dias idade	M - 14 dias idade	M - 21 dias idade	M - 28 dias idade
Média	19,26	21,1	22,98	25,9	27,29	27,67
Erro padrão	0,82	1,45	0,51	0,22	0,36	0,66
Mediana	19,39	20,17	22,97	25,93	27,52	27,47
Modo	20,67	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
Desvio padrão	1,64	2,9	1,02	0,44	0,73	1,32
Variância da amostra	2,68	8,39	1,05	0,19	0,53	1,74
Curtose	-5,56	3,03	-2,37	-5,48	3,04	1,71
Assimetria	-0,08	1,64	0,05	-0,09	-1,62	0,87
Intervalo	3,06	6,58	2,31	0,83	1,67	3,17
Mínimo	17,61	18,73	21,84	25,45	26,23	26,28
Máximo	20,67	25,31	24,15	26,28	27,9	29,45
Soma	77,05	84,38	91,93	103,58	109,16	110,66
Contagem	4	4	4	4	4	4
Maior(1)	20,67	25,31	24,15	26,28	27,9	29,45
Menor(1)	17,61	18,73	21,84	25,45	26,23	26,28
Nível de confiança(95,0%)	2,61	4,61	1,63	0,7	1,16	2,1

## ANEXO F - Análise de dispersão para os traços moldados





## ANEXO G - Análise de variância para os traços moldados

Variável – Tratamento dos Resíduos de Madeira – **variância entre TP e SE**

Datas rompimento	traço TP	traço SE
01 dia	13,31	6,02
	15,1	3,7
	12,34	6,13
	13,01	4,79

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	137,117	1,000	137,117	101,363	0,000	5,987
Dentro dos grupos	8,116	6,000	1,353			
<b>Total</b>	<b>145,233</b>	<b>7,000</b>				

Variável – Tratamento dos Resíduos de Madeira – **variância entre TP e BT**

Datas rompimento	Traço TP	Traço BT
01 dia	13,31	13,42
	15,1	14,32
	12,34	12,94
	13,01	12,23

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,090	1,000	0,090	0,084	0,782	5,987
Dentro dos grupos	6,476	6,000	1,079			
<b>Total</b>	<b>6,566</b>	<b>7,000</b>				

Variável – Tratamento dos Resíduos de Madeira – **variância entre TP e M**

Datas rompimento	Traço TP	Traço M
01 dia	13,31	20,67
	15,1	17,61
	12,34	18,1
	13,01	20,67

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	67,803	1,000	67,803	33,314	0,001	55,000
Dentro dos grupos	12,212	6,000	2,035			
<b>Total</b>	<b>80,015</b>	<b>7,000</b>				

Variável – Tratamento dos Resíduos de Madeira – **variância entre SE e BT**

Datas rompimento	traço SE	Traço BT
01 dia	6,02	13,42
	3,7	14,32
	6,13	12,94
	4,79	12,23

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	130,169	1,000	130,169	124,817	0,000	5,987
Dentro dos grupos	6,257	6,000	1,043			
<b>Total</b>	<b>136,426</b>	<b>7,000</b>				

Variável – Tratamento dos Resíduos de Madeira – **variância entre SE e M**

Datas rompimento	traço SE	Traço M
01 dia	6,02	20,67
	3,7	17,61
	6,13	18,1
	4,79	20,67

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	397,761	1,000	397,761	198,992	0,000	5,987
Dentro dos grupos	11,993	6,000	1,999			
<b>Total</b>	<b>409,754</b>	<b>7,000</b>				

Variável – Tratamento dos Resíduos de Madeira – **variância entre BT e M**

Datas rompimento	Traço BT	Traço M
01 dia	13,42	20,67
	14,32	17,61
	12,94	18,1
	12,23	20,67

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	72,842	1,000	72,842	42,217	0,001	5,987
Dentro dos grupos	10,353	6,000	1,725			
<b>Total</b>	<b>83,195</b>	<b>7,000</b>				



Variável – Tratamento dos Resíduos de Madeira – **variância entre TP e SE**

Datas rompimento	traço TP	traço SE
03 dias	24,9	10,47
	25,42	10,55
	26,88	11,42
	28,72	11,82

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	475,244	1,000	475,244	281,963	0,000	5,987
Dentro dos grupos	10,113	6,000	1,685			
Total	485,357	7,000				

Variável – Tratamento dos Resíduos de Madeira – **variância entre TP e BT**

Datas rompimento	Traço TP	Traço BT
03 dias	24,9	19,49
	25,42	17,35
	26,88	19,83
	28,72	17,87

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	123,088	1,000	123,088	55,978	0,000	5,987
Dentro dos grupos	13,193	6,000	2,199			
Total	136,281	7,000				

Variável – Tratamento dos Resíduos de Madeira – **variância entre TP e M**

Datas rompimento	Traço TP	Traço M
03 dias	24,9	20,38
	25,42	25,31
	26,88	19,96
	28,72	18,73

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	57,996	1,000	57,996	10,248	0,019	5,987
Dentro dos grupos	33,957	6,000	5,659			
Total	91,953	7,000				



Variável – Tratamento dos Resíduos de Madeira – **variância entre SE e BT**

Datas rompimento	traço SE	Traço BT
03 dias	10,47	19,49
	10,55	17,35
	11,42	19,83
	11,82	17,87

NOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	114,610	1,000	114,610	120,414	0,000	5,987
Dentro dos grupos	5,711	6,000	0,952			
Total	120,321	7,000				

Variável – Tratamento dos Resíduos de Madeira – **variância entre SE e M**

Datas rompimento	traço SE	Traço M
03 dias	10,47	20,38
	10,55	25,31
	11,42	19,96
	11,82	18,73

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	201,202	1,000	201,202	45,600	0,001	5,987
Dentro dos grupos	26,474	6,000	4,412			
Total	227,676	7,000				

Variável – Tratamento dos Resíduos de Madeira – **variância entre BT e M**

Datas rompimento	Traço BT	Traço M
03 dias	19,49	20,38
	17,35	25,31
	19,83	19,96
	17,87	18,73

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	12,103	1,000	12,103	2,457	0,168	5,987
Dentro dos grupos	29,554	6,000	4,926			
Total	41,658	7,000				

Variável – Tratamento dos Resíduos de Madeira – **variância entre TP e SE**

Datas rompimento	traço TP	traço SE
07 dias	28,41	14,24
	37,59	14,47
	37,01	16,08
	37,12	12,64

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	854,911	1,000	854,911	79,392	0,000	5,987
Dentro dos grupos	64,610	6,000	10,768			
Total	919,521	7,000				

Variável – Tratamento dos Resíduos de Madeira – **variância entre TP e BT**

Datas rompimento	Traço TP	Traço BT
07 dias	28,41	28,41
	37,59	37,59
	37,01	37,01
	37,12	37,12

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,000	1,000	0,000	0,000	1,000	5,987
Dentro dos grupos	117,333	6,000	19,555			
Total	117,333	7,000				

Variável – Tratamento dos Resíduos de Madeira – **variância entre TP e M**

Datas rompimento	Traço TP	Traço M
07 dias	28,41	23,46
	37,59	22,48
	37,01	24,15
	37,12	21,84

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	290,405	1,000	290,405	28,188	0,002	5,987
Dentro dos grupos	61,815	6,000	10,303			
Total	352,220	7,000				



Variável – Tratamento dos Resíduos de Madeira – **variância entre SE e BT**

Datas rompimento	traço SE	Traço BT
07 dias	14,24	28,41
	14,47	37,59
	16,08	37,01
	12,64	37,12

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	854,911	1,000	854,911	79,392	0,000	5,987
Dentro dos grupos	64,610	6,000	10,768			
Total	919,521	7,000				

Variável – Tratamento dos Resíduos de Madeira – **variância entre SE e M**

Datas rompimento	traço SE	Traço M
07 dias	14,24	23,46
	14,47	22,48
	16,08	24,15
	12,64	21,84

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	148,781	1,000	148,781	98,182	0,000	5,987
Dentro dos grupos	9,092	6,000	1,515			
Total	157,873	7,000				

Variável – Tratamento dos Resíduos de Madeira – **variância entre BT e M**

Datas rompimento	Traço BT	Traço M
07 dias	28,41	23,46
	37,59	22,48
	37,01	24,15
	37,12	21,84

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	290,405	1,000	290,405	2,188	0,002	5,987
Dentro dos grupos	61,815	6,000	10,303			
Total	352,220	7,000				

Variável – Tratamento dos Resíduos de Madeira – **variância entre TP e SE**

Datas rompimento	traço TP	traço SE
14 dias	44,49	15,87
	39,52	17,09
	30,1	17,21
	39,56	16,03

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	956,375	1,000	956,375	52,148	0,000	5,987
Dentro dos grupos	110,037	6,000	18,339			
Total	1066,412	7,000				

Variável – Tratamento dos Resíduos de Madeira – **variância entre TP e BT**

Datas rompimento	Traço TP	Traço BT
14 dias	44,49	21,4
	39,52	23,54
	30,1	24,15
	39,56	26,43

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	422,678	1,000	422,678	20,887	0,004	5,987
Dentro dos grupos	121,418	6,000	20,236			
Total	544,096	7,000				

Variável – Tratamento dos Resíduos de Madeira – **variância entre TP e M**

Datas rompimento	Traço TP	Traço M
14 dias	44,49	25,59
	39,52	26,26
	30,1	26,28
	39,56	25,45

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	313,626	1,000	313,626	17,240	0,006	5,987
Dentro dos grupos	109,149	6,000	18,192			
Total	422,775	7,000				

Variável – Tratamento dos Resíduos de Madeira – **variância entre SE e BT**

Datas rompimento	traço SE	Traço BT
14 dias	15,87	21,4
	17,09	23,54
	17,21	24,15
	16,03	26,43

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	107,46	1,00	107,46	45,08	0,00	5,99
Dentro dos grupos	14,30	6,00	2,38			
Total	121,76	7,00				

Variável – Tratamento dos Resíduos de Madeira – **variância entre SE e BT**

Datas rompimento	traço SE	Traço M
14 dias	15,87	25,59
	17,09	26,26
	17,21	26,28
	16,03	25,45

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	174,658	1,000	174,658	515,596	0,000	5,987
Dentro dos grupos	2,033	6,000	0,339			
Total	176,691	7,000				

Variável – Tratamento dos Resíduos de Madeira – **variância entre BT e M**

Datas rompimento	Traço BT	Traço M
14 dias	21,4	25,59
	23,54	26,26
	24,15	26,28
	26,43	25,45

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	8,120	1,000	8,120	3,632	0,105	5,987
Dentro dos grupos	13,414	6,000	2,236			
Total	21,534	7,000				





Variável – Tratamento dos Resíduos de Madeira – **variância entre TP e SE**

Datas rompimento	traço TP	traço SE
21 dias	39,07	19,27
	40,04	19,54
	40,68	19,67
	43,14	22,01

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	849,544	1,000	849,544	367,351	0,000	5,987
Dentro dos grupos	13,876	6,000	2,313			
Total	863,420	7,000				

Variável – Tratamento dos Resíduos de Madeira – **variância entre TP e BT**

Datas rompimento	Traço TP	Traço BT
21 dias	39,07	26,48
	40,04	26,18
	40,68	24,94
	43,14	23,2

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	482,517	1,000	482,517	184,300	0,000	5,987
Dentro dos grupos	15,709	6,000	2,618			
Total	498,226	7,000				

Variável – Tratamento dos Resíduos de Madeira – **variância entre TP e M**

Datas rompimento	Traço TP	Traço M
21 dias	39,07	26,23
	40,04	27,9
	40,68	27,51
	43,14	27,52

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	361,402	1,000	361,402	203,812	0,000	5,987
Dentro dos grupos	10,639	6,000	1,773			
Total	372,041	7,000				

Variável – Tratamento dos Resíduos de Madeira – **variância entre SE e BT**

Datas rompimento	traço SE	Traço BT
21 dias	19,27	26,48
	19,54	26,18
	19,67	24,94
	22,01	23,2

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	51,562	1,000	51,562	26,902	0,002	5,987
Dentro dos grupos	11,500	6,000	1,917			
Total	63,062	7,000				

Variável – Tratamento dos Resíduos de Madeira – **variância entre SE e M**

Datas rompimento	traço SE	Traço M
21 dias	19,27	26,23
	19,54	27,9
	19,67	27,51
	22,01	27,52

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	102,746	1,000	102,746	95,868	0,000	5,987
Dentro dos grupos	6,430	6,000	1,072			
Total	109,177	7,000				

Variável – Tratamento dos Resíduos de Madeira – **variância entre BT e M**

Datas rompimento	Traço BT	Traço M
21 dias	26,48	26,23
	26,18	27,9
	24,94	27,51
	23,2	27,52

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	8,736	1,000	8,736	6,343	0,045	5,987
Dentro dos grupos	8,263	6,000	1,377			
Total	17,000	7,000				



Variável – Tratamento dos Resíduos de Madeira – **variância entre TP e SE**

Datas rompimento	traço TP	traço SE
28 dias	40,28	23,61
	39,26	21,62
	44,45	22,49
	39,99	20,81

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	711,588	1,000	711,588	205,355	0,000	5,987
Dentro dos grupos	20,791	6,000	3,465			
Total	732,379	7,000				

Variável – Tratamento dos Resíduos de Madeira – **variância entre TP e BT**

Datas rompimento	Traço TP	Traço BT
28 dias	40,28	26,18
	39,26	25,84
	44,45	23,95
	39,99	26,53

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	472,474	1,000	472,474	138,641	0,000	5,987
Dentro dos grupos	20,447	6,000	3,408			
Total	492,921	7,000				

Variável – Tratamento dos Resíduos de Madeira – **variância entre TP e M**

Datas rompimento	Traço TP	Traço M
28 dias	40,28	27,61
	39,26	29,45
	44,45	27,32
	39,99	26,28

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	355,378	1,000	355,378	98,284	0,000	5,987
Dentro dos grupos	21,695	6,000	3,616			
Total	377,073	7,000				

Variável – Tratamento dos Resíduos de Madeira – **variância entre SE e BT**

Datas rompimento	traço SE	Traço BT
28 dias	23,61	26,18
	21,62	25,84
	22,49	23,95
	20,81	26,53

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	24,395	1,000	24,395	17,632	0,006	5,987
Dentro dos grupos	8,301	6,000	1,384			
Total	32,696	7,000				

Variável – Tratamento dos Resíduos de Madeira – **variância entre SE e M**

Datas rompimento	traço SE	Traço M
28 dias	23,61	27,61
	21,62	29,45
	22,49	27,32
	20,81	26,28

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	61,217	1,000	61,217	38,465	0,001	5,987
Dentro dos grupos	9,549	6,000	1,591			
Total	70,766	7,000				

Variável – Tratamento dos Resíduos de Madeira – **variância entre BT e M**

Datas rompimento	Traço BT	Traço M
28 dias	26,18	27,61
	25,84	29,45
	23,95	27,32
	26,53	26,28

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	8,323	1,000	8,323	5,425	0,059	5,987
Dentro dos grupos	9,205	6,000	1,534			
Total	17,529	7,000				