

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CARLOS FREDERICO ALICE PARCHEN

**COMPÓSITO MADEIRA CIMENTO DE BAIXA DENSIDADE PRODUZIDO
COM COMPACTAÇÃO VIBRO DINÂMICA**

CURITIBA

2012

CARLOS FREDERICO ALICE PARCHEN

**COMPÓSITO MADEIRA CIMENTO DE BAIXA DENSIDADE PRODUZIDO
COM COMPACTAÇÃO VIBRO DINÂMICA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Setsuo Iwakiri
Co-orientador: Prof. Dr. José Guilherme Prata

CURITIBA

2012

Parchen, Carlos Frederico Alice

Compósito madeira cimento de baixa densidade produzido com compactação vibro dinâmica / Carlos Frederico Alice
Parchen. – Curitiba, 2012.

172 f. : il.; graf., tab.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal.

Orientador: Setsuo Iwakiri

Coorientador: José Guilherme Prata

1. Madeira. 2. Cimento - Aditivos. I. Iwakiri, Setsuo. II. Prata, José Guilherme. III. Título.

CDD 666.94



Universidade Federal do Paraná
Setor de Ciências Agrárias - Centro de Ciências Florestais e da Madeira
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal

PARECER
Defesa nº. 948

A banca examinadora, instituída pelo colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, do Setor de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná, após arguir o(a) doutorando(a) *Carlos Frederico Alice Parçhen* em relação ao seu trabalho de tese intitulado "**COMPÓSITO MADEIRA CIMENTO DE BAIXA DENSIDADE PRODUZIDO COM COMPACTAÇÃO VIBRO DINÂMICA**", é de parecer favorável à **APROVAÇÃO** do(a) acadêmico(a), habilitando-o(a) ao título de *Doutor* em Engenharia Florestal, área de concentração em **TECNOLOGIA E UTILIZAÇÃO DE PRODUTOS FLORESTAIS**.

[Assinatura]
Dr. João Vicente de Figueiredo Latorraca
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Primeiro examinador

[Assinatura]
Dr. Marianne do Rocio de Mello Maron da Costa
Universidade Federal do Paraná
Segundo examinador

[Assinatura]
Dr. Adauto José Miranda de Lima
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Terceiro examinador

[Assinatura]
Dr. Jorge Luis Monteiro de Matos
Universidade Federal do Paraná
Quarto examinador

[Assinatura]
Dr. Setsuo Iwakiri
Universidade Federal do Paraná
Orientador e presidente da banca examinadora



Curitiba, 09 de novembro de 2012.

[Assinatura]
Antonio Carlos Batista
Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal
Carlos Roberto Sanquetta
Vice-coordenador do curso

RESUMO

A necessidade para o atendimento das exigências humanas impulsionou a engenharia como agente transformador do meio ambiente. Neste contexto e em alguns casos, os conhecimentos desenvolvidos por métodos empíricos associado ao rigor dos métodos científicos permitiram a avaliação de processos e produtos com desempenho compatível ao fim a que se destinam. O presente trabalho teve como objetivo o estudo do compósito madeira cimento com o uso do cimento Portland moldado e compactado por meio de vibração mecânica sem a ação de prensagem e de grampeamento. Cavacos de galhos e cavacos de troncos de *Pinus* spp provenientes de desbaste em reflorestamento foram moídos e classificados em duas faixas granulométricas de partículas que proporcionaram os agregados leves de origem vegetal, utilizados como componente desse compósito. O cimento Portland CP II-Z foi empregado como aglomerante mineral e o óxido de cálcio como promotor do pré-tratamento aplicado às partículas. A metodologia consistiu do estudo prospectivo experimental do compósito com o pré-tratamento das partículas, com a mistura dos materiais e com a conformação em moldes para a formação de corpos de prova, por meio de compactação vibro mecânica. As propriedades físicas e mecânicas foram determinadas em ensaios laboratoriais atendendo a norma nacional e a norma estrangeira, ambas adaptadas. A análise e a avaliação dos resultados obtidos nesse estudo demonstraram o êxito e a possibilidade da elaboração do compósito de baixa densidade conformado em blocos e painéis e compactado por meio de vibração mecânica fazendo uso das partículas de galhos e partículas de troncos pré-tratadas com hidróxido de cálcio e aglutinadas com o cimento Portland.

Palavras Chave: Compósito. Resíduos. Pré-tratamento. Madeira cimento.

ABSTRACT

The human need leads the engineering to transform the environment. In this context, the knowledge developed by empirical methods associated with the rigor of scientific methods allowed the evaluation of the processes and products with compatible performance for the purpose that they intended. The aim of this work was to study the wood cement composites with Portland cement molded and compacted by mechanical vibration without the action of stapling. Chips of branches and chips of trunks of *Pinus* spp from reforestation, pruning were grounded and classified in two sizes of particles, which provided the lightweight aggregate as a component of the composite. The Portland cement, CP II-Z was used as a mineral binder and the calcium oxide as a promoter for the pretreatment of the particles. The methodology used was the prospective experimental study of the pretreatment of the particles, the material mixture and shaping the molds of specimens by mechanical and vibratory compaction. The physical and mechanical properties were determined by adapted standard tests. Analysis and evaluation of the results of this study demonstrated the possibility and the success of preparing the wood cement composite molded, such bricks or panels and compacted by mechanical vibration from the particles of branches and trunks, pretreated with calcium hydroxide and bonded with Portland cement.

Key Words: Composites. Wood waste. Pre-treatment. Wood Cement.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|-----|
| FIGURA 01 - EVOLUÇÃO DA HIDRATAÇÃO DA PASTA DE CIMENTO COMBINADO COM PARTÍCULAS DE QUATRO ESPÉCIES DE EUCALIPTO | 35 |
| FIGURA 02 - FAIXA GRANULOMÉTRICA PARA PARTÍCULAS DE TRONCOS APÓS PRIMEIRA PASSAGEM PELO MOINHO DE MARTELOS | 54 |
| FIGURA 03 - FAIXA GRANULOMÉTRICA PARA PARTÍCULAS DE TRONCOS APÓS SEGUNDA PASSAGEM PELO MOINHO DE MARTELOS | 54 |
| FIGURA 04 - FAIXA GRANULOMÉTRICA PARA PARTÍCULAS DE GALHOS APÓS PRIMEIRA PASSAGEM PELO MOINHO DE MARTELOS | 55 |
| FIGURA 05 - FAIXA GRANULOMÉTRICA PARA PARTÍCULAS DE GALHOS APÓS SEGUNDA PASSAGEM PELO MOINHO DE MARTELOS | 55 |
| FIGURA 06 - MAPA CONCEITUAL PARA O ESTUDO EXPLORATÓRIO DO COMPÓSITO MADEIRA CIMENTO | 61 |
| FIGURA 07 - MOLDE DO CORPO DE PROVA (A) E APARELHO DE VIBRO COMPACTAÇÃO | 66 |
| FIGURA 08 - FORMA E CORPOS DE PROVA COM PARTÍCULAS g1 E t1 | 68 |
| FIGURA 09 - ELEMENTO VIBRADOR ELÉTRICO DE 3.000 RPM | 68 |
| FIGURA 10 - CORPOS DE PROVA E MOLDES DE PVC CILÍNDRICOS | 71 |
| FIGURA 11 - CARBONATAÇÃO AO AR DAS PARTÍCULAS DE GALHOS DE <i>Pinus spp.</i> | 102 |
| FIGURA 12 - MOLDES CILÍNDRICOS EM PVC FECHADOS POR CINTAS PLÁSTICAS | 104 |
| FIGURA 13 - CURVAS DE TENSÃO DEFORMAÇÃO PARA OS TRATAMENTOS T1, T2 E T3 | 107 |
| FIGURA 14 - MOLDES DOS CORPOS DE PROVA | 116 |
| FIGURA 15 - PRÉ-TRATAMENTO DAS PARTÍCULAS DE TRONCO COM ÓXIDO DE CÁLCIO | 120 |
| FIGURA 16 - IMAGEM DAS AMOSTRAS DE PARTÍCULAS DE GALHOS E TRONCOS DEPOIS DE VINTE E QUATRO HORAS EM IMERSÃO EM ÁGUA DESTILADA | 121 |

| | |
|---|-----|
| FIGURA 17 - PROCEDIMENTOS DE DOSAGENS E PREPARO DA PASTA DE CIMENTO | 122 |
| FIGURA 18 - PROCEDIMENTOS DA MISTURA PARA O PREPARO DO COMPÓSITO | 123 |
| FIGURA 19 - PARTÍCULAS ENVOLVIDAS NA PASTA DE CIMENTO E MISTURA COMPACTADA | 124 |
| FIGURA 20 - LINHA DE TENDÊNCIA DA MÉDIA DOS RESULTADOS DO ENSAIO MECÂNICO DE RC EM FUNÇÃO AO ENSAIO FÍSICO DA ME COM USO DO CIMENTO C1 E DO CIMENTO C2 - NORMA ABNT | 142 |
| FIGURA 21 - LINHA DE TENDÊNCIA DA MÉDIA DOS RESULTADOS DO ENSAIO MECÂNICO DE RC EM FUNÇÃO DO ENSAIO FÍSICO DA ME COM USO DO CIMENTO C1 E DO CIMENTO C2 - NORMA ASTM | 144 |
| FIGURA 22 - LINHAS DE TENDÊNCIA LINEAR DA MÉDIA DOS RESULTADOS DO ENSAIO MECÂNICO À FLEXÃO SIMPLES - MOE E MOR - EM FUNÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA..... | 150 |
| FIGURA 23 - LINHAS DE TENDÊNCIA LINEAR DA MÉDIA DOS RESULTADOS DO ENSAIO MECÂNICO À FLEXÃO SIMPLES - MOE E MOR - EM FUNÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA | 151 |
| FIGURA 24 - ENSAIO DE FLEXÃO ESTÁTICA SIMPLES | 152 |
| FIGURA 25 - ENSAIO DE TRAÇÃO PERPENDICULAR À SUPERFÍCIE ADAPTADO À ADERÊNCIA AO REVESTIMENTO..... | 167 |
| FIGURA 26 - ENSAIO DE INFLAMABILIDADE DO COMPÓSITO MADEIRA CIMENTO..... | 169 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|----|
| QUADRO 01 - CONTRIBUIÇÕES DE AUTORES BRASILEIROS PARA O TEMA MADEIRA CIMENTO | 26 |
| QUADRO 02 - ELEMENTOS QUÍMICOS DA MADEIRA SECA EM ESTADO NATURAL | 33 |
| QUADRO 03 - SUBSTÂNCIAS CONSTITUINTES DA MADEIRA CONÍFERA | 34 |
| QUADRO 04 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA MÉDIA DOS COMPONENTES MACROMOLECULARES DO <i>Pinus taeda</i> | 34 |
| QUADRO 05 - OBSERVAÇÕES DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E MECÂNICAS PAINÉIS RECONSTITUÍDOS DEVIDO À GEOMETRIA DAS PARTÍCULAS | 39 |
| QUADRO 06 - TIPOS DE CIMENTO PORTLAND CP II, % DE ADIÇÕES, APLICAÇÕES E USOS | 43 |
| QUADRO 07 - PESQUISADORES E CONTRIBUIÇÕES APRESENTADAS PARA O ESTUDO DO COMPÓSITO MADEIRA CIMENTO..... | 45 |
| QUADRO 08 - PORCENTAGENS RETIDAS DOS CAVACOS DE TRONCOS E MÓDULO DE FINURA DOS CAVACOS NA INDÚSTRIA PROVENIENTES DO PICADOR..... | 52 |
| QUADRO 09 - PORCENTAGENS RETIDAS DOS CAVACOS DE GALHOS E MÓDULO DE FINURA DOS CAVACOS NA INDÚSTRIA PROVENIENTES DO PICADOR..... | 52 |
| QUADRO 10 - DENOMINAÇÃO DAS PARTÍCULAS DE <i>Pinus spp.</i> | 53 |
| QUADRO 11 - INSUMOS UTILIZADOS NA PRIMEIRA SÉRIE DE AMOSTRAS..... | 70 |
| QUADRO 12 - PRÉ-TRATAMENTOS APLICADOS ÀS PARTÍCULAS NA PRIMEIRA SÉRIE DE AMOSTRAS..... | 70 |
| QUADRO 13 - INSUMOS UTILIZADOS NA SEGUNDA SÉRIE DE AMOSTRAS | 74 |
| QUADRO 14 - PRÉ-TRATAMENTOS APLICADOS NA SEGUNDA SÉRIE DE AMOSTRAS | 74 |
| QUADRO 15 - INSUMOS UTILIZADOS NA TERCEIRA SÉRIE DE AMOSTRAS..... | 75 |
| QUADRO 16 - PRÉ-TRATAMENTOS APLICADOS NA TERCEIRA SÉRIE DE AMOSTRAS | 76 |
| QUADRO 17 - INSUMOS UTILIZADOS NA QUARTA SÉRIE DE AMOSTRAS | 76 |

| | |
|---|-----|
| QUADRO 18 - PRÉ-TRATAMENTOS APLICADOS NA QUARTA SÉRIE DE AMOSTRAS..... | 77 |
| QUADRO 19 - INSUMOS E PRÉ-TRATAMENTOS APLICADOS NA QUINTA SÉRIE DE AMOSTRAS..... | 77 |
| QUADRO 20 - RESULTADOS DAS AVALIAÇÕES DA PRIMEIRA SÉRIE DE AMOSTRAS DO COMPÓSITO MADEIRA CIMENTO COM PARTÍCULAS DE TRONCOS E GALHOS | 80 |
| QUADRO 21 - AVALIAÇÕES E RESULTADOS DA SEGUNDA SÉRIE DE AMOSTRAS DO COMPÓSITO MADEIRA CIMENTO COM PARTÍCULAS DE GALHOS | 85 |
| QUADRO 22 - PRÉ-TRATAMENTOS APLICADOS NA SEGUNDA SÉRIE DE AMOSTRAS..... | 86 |
| QUADRO 23 - AVALIAÇÕES E RESULTADOS DA TERCEIRA SÉRIE DE AMOSTRAS DO COMPÓSITO MADEIRA CIMENTO COM PARTÍCULAS DE GALHOS g2 | 88 |
| QUADRO 24 - AVALIAÇÕES E RESULTADOS DA QUARTA SÉRIE DE AMOSTRAS DO COMPÓSITO MADEIRA CIMENTO COM PARTÍCULAS DE TRONCOS E PARTÍCULAS DE GALHOS | 90 |
| QUADRO 25 - AVALIAÇÕES E RESULTADOS DA QUINTA SÉRIE DE AMOSTRAS DO COMPÓSITO MADEIRA CIMENTO COM PARTÍCULAS DE GALHOS | 93 |
| QUADRO 26 - PLANO EXPERIMENTAL DO ESTUDO COM <i>Pinus spp</i> | 99 |
| QUADRO 27 - AVALIAÇÕES E RESULTADOS DAS AMOSTRAS DO COMPÓSITO MADEIRA CIMENTO COM PARTÍCULAS DE GALHOS..... | 103 |
| QUADRO 28 - PLANO EXPERIMENTAL PARA A MOLDAGEM E A PRODUÇÃO DO COMPÓSITO MADEIRA CIMENTO | 118 |
| QUADRO 29 - ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICOS, NORMAS UTILIZADAS E QUANTIDADE DE CORPOS DE PROVA PARA A PRODUÇÃO DE COMPÓSITO MADEIRA CIMENTO | 119 |
| QUADRO 30 - MASSA ESPECÍFICA DE MATERIAIS EMPREGADOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL..... | 131 |
| QUADRO 31 - VALORES DE MOE E MOR DE MATERIAIS DE BAIXA DENSIDADE | 153 |
| QUADRO 32 - RELAÇÃO ENTRE OS CUSTOS DO COMPÓSITO MADEIRA CIMENTO E O COMPÓSITO ARGAMASSA DE CIMENTO E AREIA MINERAL..... | 171 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|-------------|--|-----|
| TABELA 01 - | RELAÇÃO ENTRE MASSA ESPECÍFICA E RESISTÊNCIA DE MADEIRAS CONÍFERAS..... | 29 |
| TABELA 02 - | DIMENSÕES DAS SÉRIES DE PENEIRAS, GRANULOMETRIAS E MÓDULO DE FINURA DAS PARTÍCULAS PARA TRONCOS E GALHOS, APÓS DUAS REDUÇÕES NO MOINHO DE MARTELOS..... | 62 |
| TABELA 03 - | PLANO EXPERIMENTAL PARA O ESTUDO PROSPECTIVO DO COMPÓSITO MADEIRA CIMENTO – FATOR ÁGUA CIMENTO 0,5..... | 64 |
| TABELA 04 - | AVALIAÇÃO E RESULTADOS DAS SÉRIES DE AMOSTRAS PRELIMINARES DE TRATAMENTOS DA PROSPECÇÃO DO COMPÓSITO MADEIRA CIMENTO - FATOR ÁGUA CIMENTO = 0,5..... | 79 |
| TABELA 05 - | AVALIAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DO COMPÓSITO, QUANTIDADE DE INSUMOS E PRÉ-TRATAMENTO APLICADOS ÀS PARTÍCULAS DE GALHOS <i>Pinus spp</i> | 105 |
| TABELA 06 - | MÓDULO DE FINURA DAS PARTÍCULAS DE TRONCOS E PARTÍCULAS DE GALHOS, APÓS DUAS REDUÇÕES NO MOINHO DE MARTELOS..... | 114 |
| TABELA 07 - | VALORES DAS MÉDIAS DA MASSA ESPECÍFICA DOS CORPOS DE PROVA - ABNT..... | 127 |
| TABELA 08 - | MÉDIAS DA MASSA ESPECÍFICA DOS CORPOS DE PROVA - ASTM D 1037 (1999)..... | 129 |
| TABELA 09 - | RESULTADOS DO PH DAS PARTÍCULAS DE GALHOS E PARTÍCULAS DE TRONCOS AO EXAME DE IMERSÃO EM ESTADO NATURAL E DEPOIS DE PRÉ- TRATADAS COM HIDRÓXIDO DE CÁLCIO..... | 132 |
| TABELA 10 - | VALORES MÉDIOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA E INCHAMENTO EM ESPESSURA DO COMPÓSITO COM USO DO CIMENTO C1..... | 134 |
| TABELA 11 - | VALORES MÉDIOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA E INCHAMENTO EM ESPESSURA DOS COMPÓSITOS COM USO DO CIMENTO C2..... | 136 |
| TABELA 12 - | VALORES MÉDIOS DE EXPANSÃO LINEAR DO COMPÓSITO MADEIRA CIMENTO..... | 138 |
| TABELA 13 - | MÉDIAS DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO - ABNT..... | 140 |

| | |
|--|-----|
| TABELA 14 - MÉDIAS DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO – ASTM..... | 143 |
| TABELA 15 - VALORES DAS MÉDIAS DAS RESISTÊNCIAS À TRAÇÃO PERPENDICULAR ÀS SUPERFÍCIES - LIGAÇÃO INTERNA – EM..... | 147 |
| TABELA 16 - VALORES MÉDIOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE E MÓDULO DE RUPTURA DO COMPÓSITO MADEIRA CIMENTO COM USO DO CIMENTO C1 E DO CIMENTO C2..... | 149 |
| TABELA 17 - MÉDIA DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO PERPENDICULAR ÀS SUPERFÍCIES PARA VERIFICAÇÃO DO ARRANCAMENTO DO REVESTIMENTO..... | 168 |
| GRÁFICO 01 -FAIXAS GRANULOMÉTRICAS PARA PARTÍCULAS DE TRONCOS E GALHOS APÓS A PRIMEIRA E SEGUNDA PASSAGEM PELO MOINHO DE MARTELOS..... | 56 |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|---------|---|
| ABCI | - Associação Brasileira da Construção Industrializada |
| ABCP | - Associação Brasileira de Cimento Portland |
| ABRAF | - Associação Brasileira dos Produtores de Floresta Plantada |
| ABNT | - Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| APA | - Engineered Wood Association American Plywood Association |
| ASTM | - American Society for Testing and Materials |
| CONAMA | - Conselho Nacional do Meio Ambiente |
| CREA PR | - Conselho Regional de Engenharia Paraná |
| EN | - European Norm |
| IPT | - Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo |
| NBR | - Norma Brasileira ABNT |
| SNIC | - Sindicato Nacional da Indústria do Cimento |
| TAPPI | - Technical Association of the Pulp and Paper Industry |
| UFPR | - Universidade Federal do Paraná |
| USP | - Universidade de São Paulo |

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|---------------------|---|
| A/C | - Fator água cimento |
| C1 | - Cimento Portland CP II – Z produzido pelo fabricante A |
| C2 | - Cimento Portland CP II – Z produzido pelo fabricante B |
| CaO | - Óxido de cálcio |
| Ca(OH) ₂ | - Hidróxido de cálcio |
| CP | - Corpo de prova |
| CV | - Coeficiente de Variação Estatística da Média |
| DAP | - Diâmetro à Altura do Peito |
| g1 | - Partículas de galhos - faixa granulométrica 1 com maior módulo de finura |
| g2 | - Partículas de galhos - faixa granulométrica 2 com menor módulo de finura |
| ME | - Massa específica aparente |
| MOE | - Módulo de Elasticidade à Flexão Estática |
| MOR | - Módulo de Ruptura à Flexão Estática |
| PVC | - Cloreto de Polivinila |
| RC | - Resistência à compressão |
| RTPS | - Resistência à tração perpendicular à superfície |
| t1 | - Partículas de troncos - faixa granulométrica 1 com maior módulo de finura |
| t2 | - Partículas de troncos - faixa granulométrica 2 com menor módulo de finura |

LISTA DE UNIDADES

| | |
|---------------------|--|
| cm | - centímetro |
| daN | - decanewton |
| dm ³ | - decímetro cúbico |
| m ² | - metro quadrado |
| MF | - módulo de finura |
| MPa | - megapascal |
| g | - grama |
| g/cm ³ | - gramas por centímetro cúbico |
| kgf/cm ² | - quilograma força por centímetro quadrado |
| kg/m ³ | - quilograma por metro cúbico |
| m | - metro |
| m ² | - metro quadrado |
| mm | - milímetro |
| µm | - micro |
| RPM | - rotações por minuto |
| t | - tonelada |
| t/m ³ | - toneladas por metro cúbico |

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1 INTRODUÇÃO | 20 |
| 1.1 OBJETIVO PRINCIPAL | 21 |
| 1.1.1 Objetivos específicos..... | 21 |
| 1.2 JUSTIFICATIVA | 22 |
| 1.2.1 Aspecto tecnológico e econômico | 22 |
| 1.2.2 Aspecto ambiental..... | 22 |
| 1.2.3 Aspecto social | 23 |
| 1.4 ESTRUTURA DA TESE..... | 24 |
| 2 REVISÃO DE LITERATURA | 25 |
| 2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA | 25 |
| 2.1.1 Construções e a madeira | 25 |
| 2.1.2 Compósito madeira cimento no Brasil..... | 26 |
| 2.1.3 Compósito madeira cimento no exterior | 27 |
| 2.2 MADEIRA | 28 |
| 2.2.1 Propriedades anatômicas da madeira..... | 32 |
| 2.2.2 Propriedades químicas da madeira | 33 |
| 2.2.3 <i>Pinus spp.</i> | 35 |
| 2.3 AGREGADOS | 36 |
| 2.3.1 Agregados naturais e artificiais | 36 |
| 2.3.2 Agregados para concretos de cimento Portland..... | 37 |
| 2.3.3 Agregados leves..... | 37 |
| 2.4 PARTÍCULAS DE MADEIRA | 37 |
| 2.4.1 Geometria das partículas | 38 |
| 2.5 AGLOMERANTES..... | 41 |

| | |
|---|-----------|
| 2.5.1 Cimentos | 41 |
| 2.5.1.1 Cimento Portland CP II - NBR 11578 (ABNT, 1991)..... | 42 |
| 2.5.2 Aditivos e adesivos..... | 44 |
| 2.6 COMPÓSITOS COM MADEIRA | 45 |
| 2.7 SISTEMAS CONSTRUTIVOS | 46 |
| 2.7.1 Caracterização de sistemas | 47 |
| 2.7.2 Construção e CO ₂ | 50 |
| 3 INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL PRELIMINAR DOS MATERIAIS E MÉTODOS | 51 |
| 3.1 CARACTERIZAÇÃO E PREPARO DOS AGREGADOS E DAS PARTÍCULAS VEGETAIS..... | 51 |
| 3.1.1 Partículas de Troncos e Partículas de Galhos | 53 |
| 3.1.2 Caracterização dos aglomerantes e aditivos..... | 57 |
| 3.1.3 Caracterização dos elementos auxiliares | 57 |
| 4 ESTUDO PROSPECTIVO EXPERIMENTAL DO USO DO CIMENTO PORTLAND PARA O DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITO DE MADEIRA CIMENTO MOLDADO COM AUXÍLIO DE COMPACTAÇÃO VIBRO DINÂMICA..... | 58 |
| 4.1 RESUMO..... | 58 |
| 4.2 INTRODUÇÃO | 59 |
| 4.2.1 Objetivo | 60 |
| 4.2.2 Objetivo específico | 61 |
| 4.3 MATERIAIS E MÉTODOS | 61 |
| 4.3.1 Materiais..... | 62 |
| 4.4 METODOLOGIA APLICADA | 64 |
| 4.4.1 Primeira Série de amostras com avaliação qualitativa | 65 |
| 4.4.1.1 Tratamento T1 com partículas de tronco t1..... | 65 |

| | |
|--|----|
| 4.4.1.2 Tratamento T2 com partículas de tronco t1 e acréscimo de cimento..... | 66 |
| 4.4.1.3 Tratamento T3 com partículas de galhos g2 com aditivo..... | 67 |
| 4.4.1.4 Tratamento T4 com partículas de galhos g2 sem aditivo e com hidróxido de cálcio..... | 69 |
| 4.4.1.5 Elaboração dos compósitos exploratórios para produção dos protótipos..... | 70 |
| 4.4.2 Segunda Série de amostras com avaliação quantitativa e com pré-tratamento das partículas | 71 |
| 4.4.2.1 Tratamento T1 com partículas de galhos g2 e imersão em água..... | 72 |
| 4.4.2.2 Tratamento T2 com partículas de galhos g2 e imersão em hidróxido de cálcio..... | 73 |
| 4.4.2.3 Tratamento T3 com partículas de galhos g1 e imersão em hidróxido de cálcio..... | 73 |
| 4.4.3 Terceira série de amostras com avaliação quantitativa do efeito da ação de aditivos para a construção civi | 74 |
| 4.4.4 Quarta série de amostras com avaliação quantitativa do efeito da adição de aditivos sobre a alternância de uso entre partículas de galhos e de troncos | 76 |
| 4.4.5 Quinta série de amostras adaptada da norma ASTM D 1037 (1999)..... | 77 |
| 4.5 RESULTADOS E DISCUSSÕES | 78 |
| 4.5.1 Resultados da Primeira Série de Amostras | 80 |
| 4.5.2 Resultados da Segunda Série de Amostras com Avaliação Quantitativa | 85 |
| 4.5.3 Resultados da Terceira Série de Amostras com Avaliação Qualitativa e Quantitativa..... | 88 |
| 4.5.4 Resultados da Quarta Série de Amostras com Alternância do Uso de Partículas e Alternância das Faixas Granulométricas de Galhos e Troncos..... | 90 |
| 4.5.5 Resultados da Quinta Série de Amostras com Avaliação do Formato dos Moldes | 93 |

| | |
|--|------------|
| 4.6 CONCLUSÃO..... | 95 |
| 5 INFLUÊNCIA DO PRÉ-TRATAMENTO COM HIDRÓXIDO DE CÁLCIO NAS PARTÍCULAS DE GALHOS DE <i>PINUS</i> SPP EM COMPÓSITOS DE MADEIRA CIMENTO..... | 96 |
| 5.1 RESUMO..... | 96 |
| 5.2 INTRODUÇÃO | 97 |
| 5.2.1 Objetivo | 98 |
| 5.3 MATERIAIS E MÉTODOS | 98 |
| 5.3.1 Partículas Vegetais de Madeira..... | 98 |
| 5.3.2 Aglomerantes | 100 |
| 5.3.3 Aditivos Plastificantes..... | 101 |
| 5.3.4 Pré-tratamento aplicado às Partículas | 101 |
| 5.3.5 Compósito Madeira Cimento com Pré-tratamento das partículas | 103 |
| 5.3.6 Condicionamento dos corpos de prova das amostras..... | 104 |
| 5.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 105 |
| 5.5 CONCLUSÃO..... | 109 |
| 6 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO COMPÓSITO MADEIRA CIMENTO MOLDADO POR COMPACTAÇÃO VIBRO DINÂMICA..... | 110 |
| 6.1 RESUMO..... | 110 |
| 6.2 INTRODUÇÃO | 111 |
| 6.2.1 Objetivo | 112 |
| 6.2.2 Objetivos Específicos | 112 |
| 6.3 MATERIAIS E MÉTODOS | 114 |
| 6.3.1 Partículas | 114 |
| 6.3.2 Aglomerantes | 114 |
| 6.3.3 Moldes para os corpos de prova | 115 |

| | |
|--|------------|
| 6.3.4 Aditivos..... | 117 |
| 6.3.5 Equipamentos | 117 |
| 6.4 PRODUÇÃO DO COMPÓSITO MADEIRA CIMENTO | 118 |
| 6.4.1 Plano experimental..... | 118 |
| 6.4.2 Ensaio físicos e ensaios mecânicos | 118 |
| 6.4.3 Preparo das partículas | 119 |
| 6.4.4 Pré-tratamento aplicado às partículas..... | 120 |
| 6.4.5 Preparo do compósito madeira cimento | 121 |
| 6.4.6 Cura dos corpos de prova | 124 |
| 6.4.7 Ensaio físicos e mecânicos do compósito | 125 |
| 6.4.8 Análise estatística | 125 |
| 6.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 126 |
| 6.5.1 Características Físicas e Química..... | 126 |
| 6.5.1.1 Massa específica dos compósitos..... | 126 |
| 6.5.1.2 pH das partículas | 132 |
| 6.5.1.3 Absorção de água e inchamento em espessura | 134 |
| 6.5.1.4 Expansão linear do compósito | 138 |
| 6.5.2 Características Mecânicas | 140 |
| 6.5.2.1 Resistência à compressão | 140 |
| 6.5.2.2 Resistência à tração perpendicular às superfícies – Ligação Interna..... | 147 |
| 6.5.2.3 Módulo de elasticidade e ruptura à flexão estática - MOE e MOR..... | 149 |
| 6.6 CONCLUSÃO..... | 154 |
| 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS | 155 |
| 8 RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS | 157 |
| REFERÊNCIAS..... | 158 |
| ESTUDOS COMPLEMENTARES..... | 166 |

1 INTRODUÇÃO

A continuidade da qualidade da vida no planeta decorre da responsabilidade das atitudes que os intervenientes nos processos de desenvolvimento venham a tomar, de acordo com MESEGUER (1991). A Enciclopédia Britânica (2010) define “a engenharia como reconhecida transformadora dos recursos naturais para o bem da humanidade”. As ações de transformação dos recursos naturais devem ser guardadas com mais respeito à natureza do que foram até o momento, atitudes de educação para a operação e conservação e o destino destes recursos naturais deve ser cercado de medidas que contenham conscientização dos intervenientes, isto é, todos os participantes no processo da cadeia produtiva da construção civil.

Embora as atitudes em relação ao uso e conservação da madeira já tenham sido agregadas ao processo construtivo, é necessário tornar permanente o conteúdo dos conhecimentos, a toda escala no processo produtivo da indústria da construção civil. Os poucos exemplos de construções com o uso de madeira engenheirada no Brasil acredita Szücs (2010) se deve ao fato que, são poucas as escolas de engenharia e de arquitetura que tratam da aplicação das madeiras sob técnicas mais avançadas e os currículos escolares estão voltados para as construções com estrutura de concreto armado e estruturas metálicas.

A elaboração de um compósito de madeira cimento requereu o uso de partículas geradas a partir de galhos e troncos de *Pinus* spp pré tratadas com hidróxido de cálcio e uso do cimento Portland, como aglomerante, compactados por meio de técnica de vibro compactação mecânica. Pesquisava-se um compósito com características físicas e mecânicas advindas da matriz cimentícia associada às características e qualidades pertinentes à madeira empregada como insumo. A sua introdução na construção civil ou em situações onde os dois atributos dos materiais utilizados na mistura são requeridos, conduziu essa pesquisa, para obtenção de um novo produto com uma nova metodologia, diferente do compósito já conhecido e desenvolvido. As limitações nessa pesquisa foram decorrentes das situações que se apresentaram devido à observação e análise dos resultados dos ensaios físicos e mecânicos realizados.

1.1 OBJETIVO PRINCIPAL

Estudar a produção de compósito de madeira cimento de baixa densidade com uso de cimento Portland compactado por meio de vibração dinâmica.

1.1.1 Objetivos específicos

- a) Verificar a possibilidade do uso de cimento Portland do tipo CP II – Z como aglomerante mineral das partículas de madeira de *Pinus* spp, pré-tratadas com hidróxido de cálcio como aditivo químico.
- b) Verificar a viabilidade técnica do uso de cavacos gerados a partir de troncos e de galhos de *Pinus* spp.
- c) Verificar a influência de duas diferentes granulometrias de *Pinus* spp no comportamento dos compósitos de madeira cimento de baixa densidade.
- d) Estudar a possibilidade de compactação dos elementos de madeira cimento por meio de ação mecânica vibratória sem o uso de prensa ou grampeamento dos elementos de madeira cimento pós-moldados.
- e) Avaliar propriedades de referências físicas e mecânicas, de resistência à compressão, de resistência à tração perpendicular as faces, do MOE e MOR em flexão estática do compósito de madeira cimento.
- f) Estudar a possibilidade de moldagem dos elementos de madeira cimento em moldes previamente conformados.
- g) Avaliar a possibilidade da moldagem e o comportamento dos elementos de madeira cimento com elevado índice de vazios.
- h) Verificar a possibilidade de introdução da produção de elementos de madeira cimento como fator de incremento de valor aos resíduos das serrarias e aos resíduos do desbaste nas atividades silviculturais.

1.2 JUSTIFICATIVA

A simplicidade, a facilidade e a técnica de obtenção de elementos pré-fabricados com concreto de cimento Portland, para a construção civil, consoante a esse domínio técnico com sua simplicidade de produção pode ser estendido para a área de conhecimento industrial madeireiro a fim de proporcionar um novo horizonte de geração de riqueza e renda, agregando valor aos possíveis resíduos gerados durante o processo de transformação da madeira cultivada.

1.2.1 Aspecto tecnológico e econômico

A atual forma de obtenção de peças ou elementos pré-fabricados, também conhecidos como artefatos de cimento, tem aceitação reconhecida pela simplicidade e facilidade, pois dispensam complicadas e caras linhas de produção. A cadeia produtiva pode se estabelecer junto às serrarias ou processadoras de madeira de reflorestamento, mediante a introdução nessas plantas de produção, de equipamentos encontrados na construção civil e operados por trabalhadores com qualificações profissionais encontradas nos meios urbanos ou rurais. A geração de renda mediante o agregar de valor a situações existentes é o desafio que buscam todos aqueles que gerem essas linhas de produção em funcionamento. Portanto, a concepção de um compósito constituído por insumos existentes no ambiente madeireiro e o cimento Portland podem despertar o interesse desse tradicional setor industrial.

1.2.2 Aspecto ambiental

O custo e a facilidade de obtenção da madeira em determinadas situações proporcionou e estabeleceu depósitos de resíduos resultantes do processamento e desdobro de toras, que embora contrariando as técnicas de aproveitamento energético dessa biomassa, em algumas circunstâncias ainda são incineradas a céu aberto. Há mudança do rumo e do pensamento vigente na cultura brasileira, pois entendia-se que o “entulho”, hoje tratado como resíduo, era sinônimo de material inútil e visto como material sem valor, o qual as pessoas procuram se desfazer,

pagando para que o mesmo fosse subtraído dos respectivos sentidos de quem o gerou. Portanto, a originalidade deste estudo está em analisar e conhecer os resíduos provenientes de fontes renováveis da natureza e utilizá-los na construção civil. O entulho da construção, entre os resíduos de concreto e resíduos de alvenaria, por sua vez já exercem contribuição em novos concretos produzidos a partir de agregados reciclados, e o compósito com resíduos renováveis de florestas plantadas detém um aspecto novo ainda a ser estudado e pesquisado adequadamente em nível nacional e internacional.

1.2.3 Aspecto social

A contribuição social proporcionada pela engenharia civil como alavanca de desenvolvimento é inegável. A necessidade de moradias está contida em todas as políticas públicas declaradas pelos governantes dos países, desenvolvidos ou não. O estudo e a pesquisa orientada à simplicidade, facilidade de obtenção e introdução nas construções de moradias, onde houver compatibilidade com a necessidade de conforto ambiental proporcionado pela qualidade intrínseca de um compósito de madeira cimento, a custos compatíveis a partir de resíduos renováveis, poderá incrementar e despertar em empresas interessadas, a geração de novos empregos. A produção do compósito madeira cimento requer o mesmo tipo de mão de obra e equipamento empregados nas 582 indústrias e estabelecimentos registrados no CREA PR (2012) de artefatos de cimento Portland no Estado do Paraná.

1.4 ESTRUTURA DA TESE

A estrutura da tese foi organizada em oito capítulos, que se referem respectivamente à: introdução, revisão de literatura, materiais e métodos, encaminhamento inicial do processo prospectivo, estudo do compósito, comentários e discussão dos resultados, conclusão e considerações finais.

O primeiro capítulo introduz o estudo, apresenta o problema de pesquisa, os objetivos buscados, a justificativa e a estrutura do trabalho.

O segundo capítulo consiste na revisão de literatura para contextualização do tema.

O terceiro capítulo consta da descrição da investigação experimental preliminar dos materiais e métodos empregados.

O quarto capítulo apresenta a descrição do encaminhamento inicial do estudo prospectivo do uso do cimento e do pré-tratamento das partículas, em cinco séries de tratamentos, com seus resultados, comentários e discussões e com avaliações qualitativas e quantitativas.

O quinto capítulo descreve a influência do pré-tratamento das partículas com hidróxido de cálcio, possibilitando a moldagem para avaliação dos corpos de prova do compósito de maneira quantitativa, por meio da adaptação da norma brasileira para concreto de cimento Portland CP II - Z para agregados minerais. Apresenta seus resultados, comentários e discussões.

O sexto capítulo apresenta a avaliação, observação e análise dos resultados das propriedades físicas e mecânicas do compósito madeira cimento moldado por compactação vibro dinâmica.

O sétimo capítulo apresenta as considerações finais.

O oitavo capítulo apresenta recomendações para trabalhos futuros no contexto de compósitos de madeira cimento.

2 REVISÃO DE LITERATURA

No capítulo de revisão de literatura se buscou informações disponíveis no atual estado da arte, para embasar o desenvolvimento do estudo do compósito madeira cimento.

2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

O enfoque da contextualização do tema desse estudo permitiu uma correspondência biunívoca entre o entendimento de questões da área de conhecimento da Engenharia de Construções Cíveis e das Ciências Florestais.

2.1.1 Construções e a madeira

A madeira segundo o Instituto de Pesquisa Tecnológica (IPT, 2012) é “usada de diversas formas em usos temporários, como moldes e fôrmas para concreto, andaimes e escoramentos na construção civil. É utilizada nas estruturas de cobertura, nas esquadrias, nos forros, nos revestimentos e pisos na sua forma nobre com aspecto natural. Ainda como peças serradas nas formas de vigas, caibros, pranchas e tábuas são dispostas em estruturas de coberturas”.

Para o IPT (2012) no Estado de São Paulo, a madeira usada em andaimes, moldes e fôrmas para concreto representa 33% da madeira consumida e, a construção de obras verticalizada é a maior consumidora, com aproximadamente 485 mil metros cúbicos anuais, cujo volume representa 80% da madeira consumida nesse segmento da construção civil.

A introdução de peças previamente elaboradas, como é possível se obter a partir de elementos de madeira, nos processos construtivos, proporciona a racionalização e melhora os processos de gestão. Tais processos, segundo Gehbauer (2004) surgiram originalmente na indústria com linhas de montagem manufaturadas.

A indústria da construção em todos os países de acordo com Gehbauer (2004) está posicionada entre os maiores ramos da economia, possuindo como forte cliente a estrutura pública, pois esta compra todas as modalidades de produtos ofertados pela cadeia produtiva da indústria da construção, em infra estrutura e manutenção do patrimônio existente e, portanto onde as reservas de racionalização, isto é, onde as técnicas aprimoradas para o aumento de produtividade podem ser instaladas. A madeira quer industrializada ou serrada proporciona racionalização das fases construtivas, dando margem à produção de peças que podem ser projetadas, produzidas ou construídas e montadas em canteiros de obras de construção com precisão, velocidade e economia.

2.1.2 Compósito madeira cimento no Brasil

A consistência e atualidade do assunto podem ser expressas por alguns trabalhos de teses e dissertações disponíveis no Banco de Tese e Dissertações apresentadas pelo Quadro 01.

| TÍTULO DO TRABALHO | AUTOR | INSTITUIÇÃO | ANO |
|--|---------------------------------|--|------|
| Compósito de lodo de estação de tratamento de água e serragem de madeira para uso como agregado graúdo em concreto. | Francis Rodrigues de Souza | Universidade de São Paulo | 2010 |
| Desempenho de duas espécies florestais em combinação com casca de arroz na fabricação de painéis cimento madeira. | Daniela Silva Lilge | Universidade Federal de Santa Maria | 2009 |
| Utilização de resíduos de <i>Pinus</i> spp e materiais cimentícios alternativos na produção de blocos para alvenaria estrutural. | Adauto José Miranda de Lima | Universidade Federal do Paraná | 2009 |
| Fabricação de solo-cimento com adição de resíduos de madeira provenientes da construção civil. | Maxiliano Perdigão dos Santos | Universidade Federal de Minas Gerais | 2009 |
| Aproveitamento de resíduos da madeira de candeia (<i>Eremanthus erythropappus</i>) para produção de chapas de partículas. | Rosimeire Cavalcante dos Santos | Universidade Federal de Lavras | 2008 |
| Compósitos de serragem de madeira e resíduos de recauchutagem de pneu. | Denísia Gonçalves de Macedo | Universidade de Brasília | 2008 |
| Utilização de resíduos da indústria madeireira para fabricação de chapas cimento-madeira. | Alberto Alexandre Costa e Souza | Universidade Federal do Pará | 2006 |
| Contribuição para o desenvolvimento de compósito cimento-madeira com materiais da região amazônica. | Fábio de Oliveira Fonseca | Universidade Federal do Pará | 2005 |
| Caracterização do compósito cimentício com a adição de particulados de madeira - Espécie <i>Pinus Taeda</i> . | Luciano Senff | Universidade do Estado de Santa Catarina | 2004 |

QUADRO 01 - CONTRIBUIÇÕES DE AUTORES BRASILEIROS PARA O TEMA MADEIRA CIMENTO

FONTE: BIBLIOTECA DIGITAL BRASILEIRA DE TESES E DISSERTAÇÕES BDTD (2011)

No Brasil, na região Sul, onde se apresenta a combinação do clima e das correntes imigratórias procedentes de países onde a técnica já era conhecida, levaram a instalação de fábricas de painéis de madeira cimento.

Conforme observa Adriazola (2008), em seu trabalho, os painéis *WWCB* (Wood Wool Cement Board) compostos de fibras longas de madeira prensadas à alta pressão, com condicionamento sob grampeamento e com cimento especiais foram desenvolvidos na Europa e no nosso país estão disponíveis para a utilização como forros, divisórias e revestimentos com atributos para proteção térmica e acústica, além da facilidade do processo de montagem, tem sua produção localizada na cidade de Blumenau em Santa Catarina.

2.1.3 Compósito madeira cimento no exterior

O compósito madeira cimento já foi consagrado no exterior como elemento pré-fabricado para uso na indústria da construção civil e elementos de proteção e conforto onde é empregado. Na Alemanha e no Leste Europeu, tendo na Rússia o seu incremento de produção na década de 1990; na América do Norte, especialmente no Canadá onde se situam fábricas para a produção deste material para exportação para países da Ásia; no Japão devido aos sistemas construtivos desenvolvidos nesse país resistentes à ação dos terremotos.

No Japão segundo Kuroki (1998), o crescimento da produção de painéis de cimento madeira em quatorze anos, compreendidos entre 1976 e o início da década de noventa, foi de dezoito vezes e na Rússia a produção foi de quatro milhões e duzentos mil metros quadrados de painéis durante a década de oitenta (TSYPIN, 1998). Entre 2005 e 2009 na Ásia aconteceram instalações de plantas industriais para produção de painéis de cimento madeira do tipo *WWCB* de até 36.000m²/dia, na Rússia, para o mesmo tipo de painéis com espessura de 5,0 cm entre 2009 e 2010, para produzir 24.000m²/dia e na China recentemente entre 2010 e 2011 foram montadas instalações capazes de produzir 36.000 m²/dia (ELTOMATION, 2012).

2.2 MADEIRA

A maioria dos vegetais na natureza não produz madeira (COSTA, 2012). Entretanto, nos vegetais em que a produção da madeira é existente, ela se dá de uma forma indireta, isto é, se inicia nas folhas clorofiladas por meio da fotossíntese. Neste processo, conhecido como biosíntese, são formados os carboidratos que nutrem todo o vegetal. Embora a madeira pareça compacta e homogênea, trata-se de um conjunto de elementos celulares, unidos entre si, formando um tecido vegetal com atributos bem definidos para os fins a que se destinam durante a vida da árvore. Basicamente todas as madeiras são formadas pelos mesmos elementos químicos, no entanto, os arranjos dos elementos do lenho definem a estrutura das respectivas madeiras. Os arranjos propiciam variabilidade da madeira dentro da mesma espécie e dentro de uma mesma árvore.

As madeiras de coníferas são uniformes em estrutura e em desenvolvimento e devido a essas características de origem genética, transmitidas ao lenho inicial e ao lenho tardio, a constância da espessura na parede celular, delgada e espessa, respectivamente para o lenho inicial e para o lenho tardio se correlaciona com a densidade da madeira (FOELKEL, 1970). Neste contexto, explica Pfeil (2009), as árvores produtoras de madeira são do tipo eugênico, isto é, crescem pela adição de camadas e se apresentam como o material de construção mais antigo dada a sua disponibilidade na natureza e relativa facilidade para a trabalhabilidade. Igualmente, segundo Pfeil (2009), por ser um material advindo da natureza apresenta heterogeneidade na sua estrutura, apresentando nós, fendas, defeitos e variação de características do conteúdo lenhoso, proporcionando interferência nas suas propriedades mecânicas. Entretanto de acordo com Pfeil (2009), tais variáveis são superadas com o uso de produtos industrialmente elaborados, chamados de madeira engenheirada (APA, 2010).

De acordo com Pfeil (2009), a propriedade relevante da madeira, para a engenharia, comparativamente com os materiais correntes na construção civil, como aço e concreto, está na relação entre a densidade da madeira (ρ) e as suas resistências características, f_c (MPa) à compressão paralela às fibras e a f_t (MPa) tração paralela às fibras, conforme a Tabela 01, a seguir.

TABELA 01 - RELAÇÃO ENTRE MASSA ESPECÍFICA E RESISTÊNCIA DE MADEIRAS CONÍFERAS

| Valores médios de massa específica aparente, resistência de madeira coníferas de reflorestamento para umidade de 12% de acordo com a NBR 7190 (ABNT, 1997) para o aço $f_t=250\text{MPa}$ e para o concreto $f_c = 40\text{MPa}$ | | | | | |
|--|--------|--------|---------|------------|------------|
| NOME | ρ | f_c | f_t | f_c/ρ | f_t/ρ |
| <i>Pinus caribea</i> | 0,579 | 34,5 | 64,8 | 59,5855 | 111,91710 |
| <i>Pinus bahamensis</i> | 0,537 | 32,6 | 52,7 | 60,7076 | 98,13780 |
| <i>Pinus elliotti</i> | 0,560 | 40,4 | 66,0 | 72,1429 | 117,85714 |
| <i>Pinus hondurensis</i> | 0,535 | 42,3 | 50,3 | 79,0654 | 94,01869 |
| <i>Pinus ocarpa</i> | 0,538 | 43,6 | 60,9 | 81,0409 | 113,19703 |
| <i>Pinus taeda</i> | 0,645 | 44,4 | 82,8 | 68,8372 | 128,37209 |
| Média da relação resistência/massa específica das madeiras | | | | 72,3588 | 110,58331 |
| Aço | 7,850* | | 250,0** | | |
| Relação resistência/massa específica do aço | | | | | 31,84713 |
| Concreto | 2,500* | 40,0** | | | |
| Relação resistência/massa específica do concreto | | | | 16,0000 | |

ρ = massa específica aparente a 12% de umidade em t/m^3
 ρ^* = massa específica em t/m^3
 f_c = resistência média característica à compressão paralelas às fibras (MPa)
 f_t = resistência média característica à tração paralelas às fibras (MPa)
 f_c^{**} = resistência média característica à compressão (MPa)
 f_t^{**} = resistência média característica à tração (MPa)

FONTE: PFEIL (2009, p. 1-193); NBR 7190 (ABNT, 1997)

NOTA: Adaptado pelo autor (2011)

A Tabela 01 apresenta os valores característicos de diversas espécies de coníferas, de reflorestamento de acordo com a NBR 7190 (ABNT, 1997) e as resistências características do aço e do concreto de cimento Portland, segundo (PFEIL, 2009). A Tabela 01 foi adaptada para estabelecer e demonstrar as relações da resistência característica do aço à tração, em relação à sua respectiva massa específica, e do concreto à compressão, comparativamente à resistência média característica das madeiras de reflorestamento, à tração e à compressão na direção paralela às fibras.

Este quociente, demonstra que a relação entre a resistência média característica das madeiras de reflorestamento à tração paralela às fibras e sua massa específica ser quatro vezes maior se comparada com a mesma relação existente para o aço, $f_t = 250 \text{ MPa}$, resistência característica média à tração. Da mesma forma a comparação, porém levando-se em conta a resistência média

característica do concreto à compressão, $f_c = 40$ MPa, resistência média a compressão aos 28 dias, em relação à resistência média característica à compressão paralela às fibras das madeiras, esta relação apresenta valores quatro vezes e meia maior se comparada com a relação existente para o concreto de cimento Portland, $f_c = 40$ MPa.

Para Bendtsen (1978), os usos dos recursos de espécies provenientes de reflorestamentos só alcançarão êxito nos objetivos se os conceitos tradicionais dos usos dos produtos derivados dessas madeiras forem adaptados às matérias primas disponíveis. Recomenda o autor que se deve levar em conta o lenho juvenil advindos das árvores de rápido crescimento. Entretanto, de acordo com Iwakiri (1989) e Prata (2010), dados estatísticos demonstram a proximidade de exaustão de florestas com árvores maduras para processamento industrial, devido a demanda pela madeira de *Pinus* e a carência de sua oferta. A disponibilidade da quantidade de madeira com características estruturais é o fator preponderante para o uso da madeira engenheirada na construção civil, de acordo com Pedrosa (2003), pois a sua vantagem devido a relação massa específica e resistência estrutural estão agregadas a preços compatíveis aos fins a que se destina o produto madeira.

O termo madeira engenheirada, de acordo com a (APA, 2010) é freqüentemente aplicado aos compensados, por terem sido a primeira forma de transformação de peças de madeira, com grandes dimensões, proporcionadas pela colagem integral de suas partes com resistência e rigidez maior do produto final, que aquela apresentada pelas suas partes constituintes. Ainda neste contexto, Pedrosa (2003) destaca no seu trabalho sobre desempenho estrutural de vigas I, a partir do conceito do uso de painéis reconstituídos, e acrescenta que, os produtores de madeira acreditam nas pesquisas das espécies exóticas das coníferas continuando dessa forma, a melhora da atividade de silvicultura, enfatizando como benefício da cultura, a redução da pressão do consumo sobre as espécies nativas.

Para Matos (1997), as madeiras oriundas de plantações de *Pinus* na região Sul do Brasil possuem características fracas relacionadas à resistência. Dependem de práticas silviculturais e manejo, e como nem sempre isto ocorre, pois o objetivo é a produtividade em detrimento de melhores propriedades mecânicas concernentes a essa madeira. Para cumprir as necessidades estruturais, segundo Matos (1997), algumas características fundamentais estão apresentadas destacadamente:

- **A massa específica:** como propriedade que transmite a medida real da quantidade de material lenhoso contida em um determinado volume. A relação entre a massa específica e as diversas propriedades mecânicas de resistência entre madeira verde e seca. A variação de massa específica na natureza de diversos tipos de madeira pode ocorrer de $0,130\text{g/cm}^3$ a $1,400\text{g/cm}^3$ de acordo com (RICHTER; BURGUER, 1978). A massa específica é a propriedade física de maior importância da madeira, pois dela dependem a sua utilização como componentes estruturais. A referência aos valores de densidade, para a madeira de *Pinus taeda* nas diversas idades retratadas por Nisgoski (2005), a densidade média se apresentou uniforme entre $0,332\text{g/cm}^3$, para a idade de 10 anos e $0,371\text{g/cm}^3$ para a idade de 14 anos.

- **O ângulo de inclinação da grã:** desvio das fibras em relação ao eixo longitudinal da peça, para ângulos exagerados, há uma tendência de distorção, os esforços acompanham a direção da grã, tornando a madeira mais frágil.

- **A largura dos anéis de crescimento:** dimensão observada a partir dos anéis de crescimento, identificável nas coníferas, constituídas de lenho inicial e lenho tardio. Durante a formação do lenho inicial acontece a maior atividade vegetativa da árvore, com grandes lumens e paredes celulares mais finas, no verão. Para o lenho tardio, nos meses de inverno, acontece lúmen menor, paredes mais grossas nas células e maior massa específica.

- **O lenho adulto e juvenil:** a relação da sua característica tendo em vista o rápido crescimento das coníferas, a importância da distinção entre os referidos lenhos situa-se na menor quantidade de massa específica, maior ângulo das microfibrilas, traqueóides mais curtos, menor quantidade de lenho tardio, paredes celulares mais finas e menor resistência para o lenho juvenil.

2.2.1 Propriedades anatômicas da madeira

A madeira, como é conhecida, é um conjunto de células. No seu conteúdo predominam células específicas para cada função. Como ser vivo, as células da árvore desempenham atribuições específicas e assim, existem células especializadas na condução de líquidos, células para armazenamento de substâncias nutritivas e células para sustentação estrutural do vegetal (RICHTER; BURGER, 1978).

O tecido celular é formado pelo câmbio. O câmbio é um tecido merismático capacitado pela natureza para gerar novos elementos celulares, ora floema, que são tecidos vivos adaptados para condução de seiva elaborada e estão no interior da casca das árvores, e ora xilema que são tecidos que se desenvolve para dentro das árvores como o alburno que se situam no interior das árvores. Pelo processo de crescimento no xilema, o alburno, a cada ano pode ser identificado por um anel de crescimento e ainda podem ser diferenciados em lenho inicial e lenho tardio. O lenho inicial está associado ao crescimento que ocorre nos meses quentes do ano, quando as plantas despertam do período de dormência, que ocorre durante o inverno (RICHTER; BURGER, 1978).

O lenho inicial ou primaveril tem como característica, células com paredes finas e lumes grandes. Já o lenho tardio, aparece no outono, pelo recrudescimento da atividade vegetativa das árvores, sendo a sua característica, células com paredes mais espessas e lumes menores. A alternância do desenvolvimento do lenho inicial e lenho tardio, pode ser observada pela tonalidade da cor mais clara para o lenho inicial e a tonalidade mais escura para o lenho tardio. A essa seqüência de variação de tonalidade de cor corresponde a um anel de crescimento. Em zonas de clima temperado, a cada ano é acrescentado um novo anel que representa o aumento anual da árvore. A espessura e a regularidade dos anéis de crescimento são indicativas de qualidades tecnológicas da madeira (RICHTER; BURGER, 1978).

O interior do tronco conhecido como cerne, e em muitas árvores apresenta uma tonalidade mais escura, pois à medida que a árvore cresce, as partes internas se distanciam do câmbio, perdem sua atividade celular, adquirem esta tonalidade mais escura, devido a deposição de substâncias químicas resultantes dos materiais de transformação, que serviam reservas contidas nas células parenquimáticas do

alburno interno e no centro do tronco encontra-se a medula constituída de tecido parenquimático suscetível de apodrecimento, causado por fungos originando toras ocas (RICHTER; BURGER, 1978).

As madeiras coníferas, devido a sua estrutura anatômica, apresentam uma estrutura simples entre as demais espécies de árvores com apenas dois tipos de células (SHIMOYAMA, 2005). As células radiais, com participação de 5% a 10% da madeira e as células axiais, longas e delgadas montando 90% a 95% do conteúdo celular da madeira, com fibras longas e delgadas, determinantes nos atributos tecnológicos do uso da madeira.

2.2.2 Propriedades químicas da madeira

O fenômeno da inibição apresentado pelo início da reação de cristalização da pasta de cimento quando misturada às partículas de madeira é influenciado diretamente pelos componentes químicos presentes no conteúdo celular da madeira. A interferência dos açúcares com estrutura molecular amorfa e cristalina, de acordo com Latorraca e Iwakiri (2005) são agentes promotores da dificuldade de ligação entre a madeira e a matriz cimentícia. Entre esses componentes orgânicos, segundo Lima (2009) encontram-se os carboidratos e componentes fenólicos. De acordo com Klock (2012), os elementos químicos predominantes na madeira seca em estado natural estão apresentados no Quadro 02. Além desses, de acordo com o mesmo autor, em menor concentração estão no conteúdo da madeira elementos químicos inorgânicos, cálcio, potássio, magnésio como macro nutrientes para o desenvolvimento vegetal.

| Carbono % | Hidrogênio % | Oxigênio % | Nitrogênio % |
|------------------|---------------------|-------------------|---------------------|
| 49 - 50 | 6 | 44 – 45 | 0,1 - 1 |

QUADRO 02 - ELEMENTOS QUÍMICOS DA MADEIRA SECA EM ESTADO NATURAL

FONTE: Klock (2012)

NOTA: Adaptado pelo autor (2012)

A composição aproximada das substâncias no conteúdo da madeiras coníferas descritas por Sjöström (1993) estão apresentadas no Quadro 03.

| Celulose % | Hemicelulose % | Lignina % | Extrativos % |
|-------------------|-----------------------|------------------|---------------------|
| 42 ± 2 | 27 ± 2 | 28 ± 3 | 3 ± 2 |

QUADRO 03 - SUBSTÂNCIAS CONSTITUINTES DA MADEIRA DE CONÍFERAS

FONTE: Sjöström (1993)

NOTA: Adaptado pelo autor (2012)

A celulose e a hemicelulose, a lignina e os extrativos são substâncias orgânicas presentes no gênero *Pinus taeda* e analisadas no trabalho de Trianoski (2010) tem a sua composição química média apresentada no Quadro 04.

| Holocelulose % | Lignina % | Extrativos totais % | Materiais inorgânicos % |
|-----------------------|------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 63,03 | 29,34 | 7,37 | 0,3 |

QUADRO 04 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA MÉDIA DOS COMPONENTES MACROMOLECULARES DO *Pinus taeda*

FONTE: Trianoski (2010)

NOTA: Adaptado pelo autor (2012)

O componente majoritário da madeira segundo Wastowski (2012), a celulose pode ser caracterizada como um polímero linear de alto peso molecular, constituído exclusivamente por D-glucose. Sua característica é a cadeia celular linear com peso celular elevado entre 162.000 a 2.400.000, e devido a suas propriedades químicas e físicas, sua estrutura supra molecular, preenche a função como o principal componente da parede celular dos vegetais. Entretanto, o mesmo autor cita ainda, as polioses constituída com cinco açúcares neutros; as hexoses (glucoses, manose e galactose) e as pentoses (xilose e arabinose), como os principais constituintes que por estarem em associação com a celulose situam-se também na parede celular. A compatibilidade entre o cimento Portland e as partículas de madeira depende dos açúcares que compõe a hemicelulose, como a pentose, a hexose, os ácidos hexurônicos e as deoxiexoses, por serem solúveis em água e em soluções alcalinas podem também se solubilizar com maior facilidade. Segundo Klock (2012), o teor desses compostos orgânicos está diretamente associado à foto-síntese originado nos órgãos foliares da copa das árvores.

A representação gráfica na Figura 01, de acordo com o estudo de Latorraca (2000) demonstra a redução da temperatura no início do processo de cristalização da pasta de cimento com as partículas de quatro espécies de Eucalipto pré-tratadas com cloreto de cálcio quando comparadas com a pasta de cimento e água sem partículas, expondo os efeitos das substâncias orgânicas componentes da madeira.

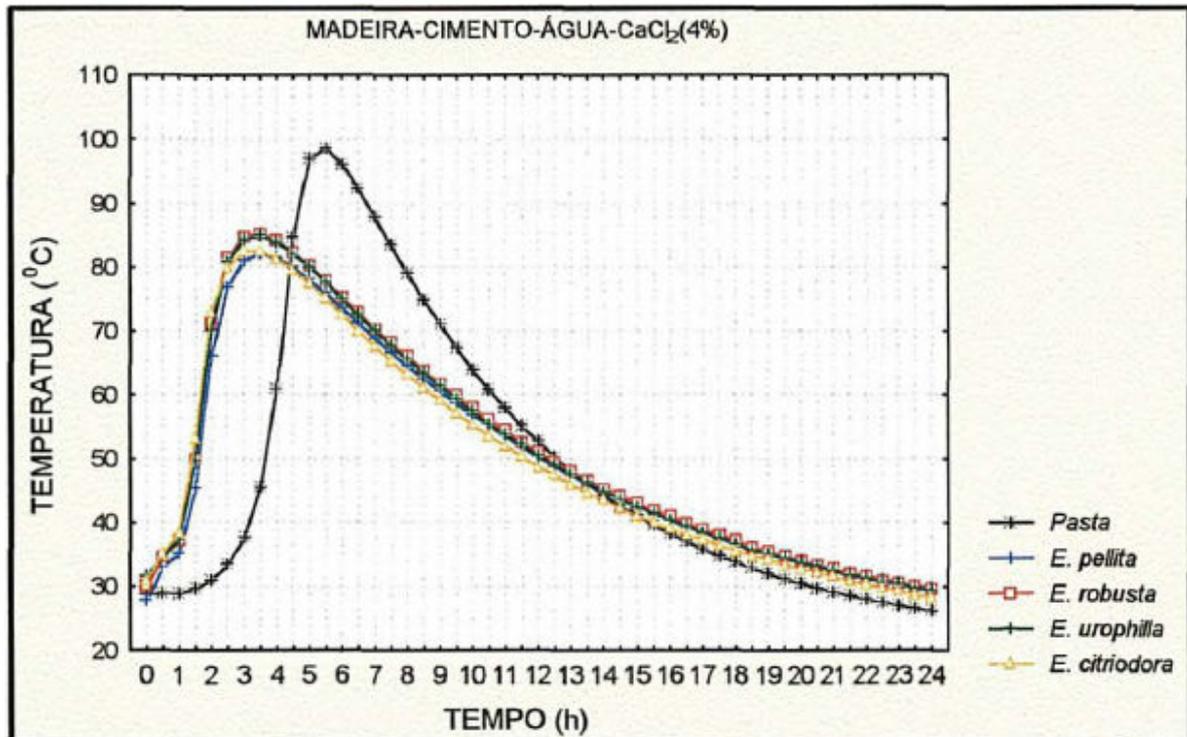


FIGURA 01 - EVOLUÇÃO DA HIDRATAÇÃO DA PASTA DE CIMENTO COMBINADO COM PARTÍCULAS DE QUATRO ESPÉCIES DE EUCALIPTO
 FONTE: Latorraca (2000, p. 108)

2.2.3 *Pinus* spp

Segundo a Associação Brasileira dos Produtores de Florestas Plantadas (ABRAF, 2012), as áreas de florestas plantadas no Brasil até o ano de 2011 atingiram 6.515.844 hectares sendo que 25,2% são de *Pinus*. No Estado do Paraná, as florestas plantadas somam 846.860 hectares, que representa a terceira maior área de floresta plantada no país, incluído está neste número, os 658.707 hectares de florestas de *Pinus*, que por sua vez, é a maior área de plantio dessa conífera no Brasil, conforme o anuário da (ABRAF, 2012). As espécies tropicais desse gênero estão sendo estudadas nas regiões Sul e Sudeste, a fim de expandir os plantios aliviando a pressão sobre as florestas naturais, segundo (PRATA, 2010).

A indústria da construção civil utiliza o *Pinus* como materiais definitivos e provisórios no elenco de insumos próprios para a construção. O gênero *Pinus* é utilizado como madeira serrada para elementos estruturais, madeira beneficiada para acabamentos e peças para vedação como forros, portas e caixilhos, para situações temporárias como construção de alojamentos e instalações auxiliares e ainda, como peças estruturais nervuradas para reforço em painéis de forma para concreto (IPT,1998).

2.3 AGREGADOS

Os agregados são definidos pela ciência dos materiais, como materiais inertes sem forma definida, com características conhecidas para aplicação em obras de engenharia e construções. Segundo Aragão (2011), suas fontes são naturais, artificiais e reciclados. Os agregados naturais são utilizados no mesmo estado em que são encontrados na natureza, enquanto as rochas que recebem processo de redução de dimensões são consideradas artificiais.

2.3.1 Agregados naturais e artificiais

Os agregados podem ser extraídos da natureza, produzidos ou reaproveitados. A argila expandida é produzida com a finalidade específica, trata-se de cerâmica exposta à elevada temperatura, se torna sinterizada e se apresenta como agregado leve (MEHTA; MONTEIRO, 2008). São utilizadas ainda, as escórias de alto forno e resíduos de siderurgia com massa superior a 2.080 kg/m^3 , como agregados em compósitos que requerem o seu peso como característica essencial. Embora, subprodutos da siderurgia sejam considerados artificiais, na mesma categoria de artificiais são empregados em situações onde as condições estruturais são requeridas com menor ênfase, os resíduos moídos do próprio canteiro de obras, como parte dos insumos componentes de argamassas e concretos (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

2.3.2 Agregados para concretos de cimento Portland

As características relevantes para os agregados para concreto de cimento Portland segundo Mehta e Monteiro (2008) incluem:

- Porosidade;
- Composição ou distribuição granulométrica;
- Absorção de Água;
- Forma e textura superficial;
- Resistência a compressão;
- Módulo de elasticidade;
- Substâncias deletérias.

2.3.3 Agregados leves

São considerados agregados leves, de origem natural e mineral, por Mehta e Monteiro (2008), aqueles que possuem massa específica menor que 1.120 kg/m^3 . Utilizados em vários tipos de concretos, são frágeis em se tratando de concretos estruturais e encontram aplicação como matérias isolantes e de enchimento, pois se apresentam como concreto de cimento Portland com resistências à compressão que variam entre 0,7 MPa e 5,5 MPa.

2.4 PARTÍCULAS DE MADEIRA

Para Iwakiri (2005), os produtos lignocelulósicos podem teoricamente, ser usados como agregados para comporem painéis minerais, mas outras matérias primas de origem vegetal, incluindo resíduos agrícolas, bem como a madeira em forma de fibras, compõem os painéis que cientificamente são chamados de cimento madeira e conhecidos comercialmente como fibro cimento. Neste contexto, as espécies coníferas têm sido usadas com maior frequência. Quando utilizadas, as espécies *Pinus* por apresentarem madeira com baixa densidade, os resultados aos esforços mecânicos de flexão estática e de tração perpendicular ao plano dos painéis, quando transformada em chapas de partículas aglomeradas com resinas, se apresentaram melhores, em comparação com as espécies de folhosas.

Entende-se a madeira como agregado para a matriz cimentícia. É encontrada com maior facilidade nas espécies de média densidade formada na maioria das vezes pela família das coníferas, proveniente de florestas cultivadas, com conteúdo celulósico apresentando melhores parâmetros para a produção de peças de madeira cimento (IWAKIRI, 2005).

Por outro lado, segundo a tecnologia de produção de concreto, o agregado é entendido como elemento inerte na produção de compósitos de matriz cimentícia, entretanto, a madeira, se apresenta com componentes químicos de natureza fenólica (taninos), os açúcares (sacarose, galactose, frutose, glicose, etc.) e minerais, comportando-se de maneira diferente em relação aos agregados considerados inertes (IWAKIRI, 2005).

As presenças das polioses da parede celular também podem interferir no processo de cura da matriz cimentícia, e devido a essas presenças desses elementos químicos, há a incompatibilidade de algumas espécies de madeira com o cimento que podem até inibir totalmente o endurecimento da matriz cimentícia. Ocorre que, a madeira pode ser tratada para desenvolver aptidão ao cimento. Os tratamentos segundo Fribort *et al.* (2011), Latorraca (2000) e Lima (2009) podem ser físicos, biológicos e químicos. A água fria ou quente, a inoculação com fungos e com hidróxido de sódio (NaOH) (1%) respectivamente, deram resultados para reduzir a incompatibilidade da madeira à matriz cimentícia.

2.4.1 Geometria das partículas

Para Iwakiri (1989), as partículas quanto as suas dimensões principais denominam-se de comprimento, largura e espessura. Em se tratando de produtos particulados aglomerados por resina sintética, a relação entre a geometria das partículas sobre a propriedade final dos produtos é pronunciada. Entretanto, a redução das dimensões das partículas representa incremento no consumo energético para produzi-las, e acompanhando Molesmi (1974) e Teishinger (2006) citado por Fribort *et al.* (2011), a redução da superfície específica das partículas aumenta o consumo do aglomerante. As diferentes dimensões influem nas razões de esbeltez e de planicidade, que por sua vez são as razões entre o comprimento e a espessura das partículas, e o comprimento e a largura das partículas, respectivamente (IWAKIRI, 1989).

Os resultados do trabalho de Iwakiri (1989) apontaram que, para a área superficial específica das partículas e a disponibilidade de resina por unidade de área das partículas, se alteram com as diferentes dimensões das partículas, também demonstrou que ficou alterada a resistência mecânica à flexão estática, para melhor, utilizando partículas mais longas. Essas relações métricas das partículas exercem influência física e mecânica nas características definitivas apresentadas no produto final, destacadamente, a área de contato entre partículas, que se traduz em propriedades mecânicas e consumo relativo de adesivo.

Entretanto, havendo um decréscimo de valor destas relações, maior quantidade de ligante será necessária por unidade de área superficial das partículas devido a superfícies laterais e extremidades mais espessas, além do que, o aglutinante nas mesmas partículas absorve maior quantidade de esforços internos. Algumas observações quanto à geometria estão apresentadas no Quadro 05, todavia, as razões de esbeltez recomendadas situam-se entre 120 e 200 para madeira de média e baixa densidade como é o caso do *Pinus*.

| GEOMETRIA | AUTOR | OBSERVAÇÃO | |
|--------------------------------------|--------------|---|--|
| Longas e finas | Brumbaugh | | Reduz o inchamento em espessura, absorção de água e expansão linear. |
| Partículas curtas e espessas | Brumbaugh | Aumentam a resistência da ligação interna. | |
| Razão de esbeltez | Brumbaugh | Mínimo 200. | |
| Área superficial por unidade de peso | Iwakiri | Maior área superficial, menor espessura. Maior quantidade de adesivo. | |
| Razão de esbeltez até 50 | Kimoto | Aumento de resistência ao arrancamento de parafusos. | |
| Comprimento da partícula até 100mm | Post | Mais resistência à flexão estática. | |

QUADRO 05 - OBSERVAÇÕES DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E MECÂNICAS PAINÉIS RECONSTITUÍDOS DEVIDO À GEOMETRIA DAS PARTÍCULAS

FONTE: IWAKIRI (1989)

NOTA: Adaptado pelo autor (2011)

Algumas características apresentadas pelas partículas quanto a sua geometria, segundo Iwakiri (1989) podem ser descritas:

- A geometria da partícula influencia diretamente as propriedades físicas e mecânicas do elemento compósito dela resultante.
- O acabamento da superfície do produto depende da geometria de seus materiais componentes.
- A operação do processo de fabricação do compósito está diretamente dependente do preparo das partículas e de suas características de origem.
- A trabalhabilidade do elemento compósito está diretamente correlacionada às características geométricas dos seus componentes.
- A condução do fluxo de partículas e formação do colchão, para a produção de painéis de madeira e quando for o caso o tempo de cura da matriz cimentícia.
- “EXCELSIOR”: comprimento do torete (até 50 cm), largura (0,5 a 5 mm) e espessura (1,0 mm).
- “FLAKE”: comprimento (2,0 a 20,0 mm), largura (0,2 a 2,5 mm) e espessura (0,1 a 0,9 mm).
- “BULKY”: fibras volumosas, comprimento (2,7 a 4,6 mm) e espessura (32 a 43 μm).

Para Maloney (1993), “a geometria da partícula está correlacionada com as propriedades físicas e mecânicas do produto final e não é possível uma fabricação de placas de partículas sem estudo da geometria das mesmas”.

A geometria das partículas é fator importante e deve-se adequar com fidelidade a sua forma. Os custos de produção das partículas estão correlacionados com o processo de redução da madeira às partículas e também com as características físicas e mecânicas finais do produto desejado.

2.5 AGLOMERANTES

Dentro do elenco dos materiais de construção, os aglomerantes minerais se apresentam como produtos pulverulentos e, em presença da água, se transformam em pasta com propriedades aglutinantes. São conhecidos como hidrófilos, podendo ser resistentes, à água como o cimento Portland, ou não, como são o gesso e a cal aérea. Também os aglomerantes de origem orgânicos conhecidos como hidrófobos, encontram sua aplicação como materiais adesivos para a construção civil, como são os betumes, os asfaltos e as resinas (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

2.5.1 Cimentos

Cimentos são conhecidos como materiais aglutinantes, selantes e impermeabilizantes. Podem ter desempenho hidráulico, isto é, o seu endurecimento somente ocorre em presença da água e, a ela resistem, se tornam impermeáveis; ou desempenho aéreo, pois possuem a propriedade de endurecimento no meio aéreo, reagem com o gás carbônico contido na atmosfera.

Aos aglomerantes resultantes da calcinação da gipsita ou carbonatos cálcio são denominados como cimentos não hidráulicos e não resistem a água (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Entretanto, reportado por Metha e Monteiro (2008), na antiga Grécia e Roma, os aglomerantes aéreos se tornaram resistente a água pela adição de pozolanas.

As pozolanas são compostas basicamente de sílica amorfa com elevada superfície específica. Foram usadas na antiguidade, encontravam-se na ilha de Santorini, na Grécia e na localidade de Pozzuoli, próximo a Nápoles na Itália, Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2010 b) e (LIMA, 2009).

O cimento Portland, de acordo com Taylor (1990) é produzido pelo aquecimento de uma mistura de calcário e argila, ou outros materiais com composição química semelhante e reatividade suficiente, em fornos rotativos e contínuos a partir da temperatura de 1450 °C. Ocorre então, fusão parcial dos minerais e os nódulos então formados são chamados de clínquer. O clínquer é misturado com uma pequena porcentagem de gesso e, finamente moído para se apresentar ao mercado como cimento.

O gesso controla a velocidade de hidratação do conjunto de minerais calcinados e pode ser parcialmente substituído por outras formas substâncias por exemplo o sulfato de cálcio. As especificações e normas em alguns países permitem a adição de outros materiais minerais durante a fase de moagem do clínquer, são os modificadores dos cimentos. O clínquer normalmente tem uma composição na ordem de 67% carbonato de cálcio (CaCO_3), 22% dióxido de silício (SiO_2) de 22%, 5% de trióxido de alumínio (Al_2O_3), 3% de óxido de ferro (Fe_2O_3) e 3% de outros componentes (TAYLOR, 1990).

Ao se adicionar água em quantidade controlada ao cimento se promoveu a hidratação do cimento, que é uma reação exotérmica. Os cimentos durante o processo de hidratação possuem quatro fases principais, conhecidas como fase da alita, fase da belita, fase do aluminato e fase do ferrite. Ainda há outras fases, como fase dos sulfatos alcalinos e fase do óxido de cálcio que estão presentes, porém em menores quantidades (TAYLOR, 1990).

Ao cimento Portland, hidratado em presença de água, dá-se a formação da pasta de cimento, reação que ocorre entre 15°C e 25°C . Para que a reação de hidratação ocorra, isto é, o endurecimento da pasta de cimento, o conhecido fator, relação água cimento, deve estar compreendido entre 0,45 - 0,65 em peso da massa de cimento e o peso de água adicionada à mistura, de acordo com (TAYLOR, 1990).

O cimento Portland é o componente básico do concreto, que por sua vez também é um compósito, na atualidade, é o segundo material mais utilizado pelo homem no planeta, ficando somente atrás do elemento água, tendo como unidade de medida, o volume consumido em milhares de metros cúbicos. O desenvolvimento do Brasil a partir do final do século XIX já necessitava do consumo de concreto, nesta época, o país importava 40 mil toneladas de cimento da Europa, segundo o Consultec, citado pelo SNIC (2010 b,) e, portanto, a idade das primeiras obras de concreto armado no Brasil possui pouco mais de um século.

2.5.1.1 Cimento Portland CP II - NBR 11578 (ABNT, 1991)

O Cimento Portland Composto modificado é comercializado comumente em lojas de materiais de construção. Este cimento apresenta resistência ao ataque dos sulfatos e é recomendado pelos produtores de cimento para obras correntes de

engenharia civil sob as diversas formas: em argamassa, em concreto simples, em concreto armado e concreto protendido, em elementos pré-moldados e em artefatos de cimento (ABCP, 2011). Determina a Associação Brasileira de Normas Técnica (ABNT) para a fabricação e emprego de cada tipo de cimento Portland tipo CP II que seus componentes se apresentem de acordo com o Quadro 06.

| CIMENTO PORTLAND MODIFICADO | ADIÇÃO | VARIAÇÃO DA ADIÇÃO EM % DE MASSA | APLICAÇÃO E USO |
|--|---------------------------------|---|--|
| Cimento Portland CP II-Z NBR 11578 | Material pozolânico | 6 a 14 +10* | Obras de construção civil em geral, elementos e artefatos pré-moldados, característica devido à adição de material pozolânico é a impermeabilidade. *Pode ainda conter adição de material carbonático (finos) até 10% em massa. |
| Cimento Portland Composto CP II-E NBR 11578 | Escória granulada de alto-forno | 6 a 34 | Obras de caráter estrutural que exijam baixo calor de hidratação; característica devido a adição, resistência a sulfatos. |
| Cimento Portland Composto CP II-F NBR 11578 | Material carbonático - filer | 6 a 10 | Aplicações gerais, obras caracterizadas pelo uso de argamassas armadas, simples projetados, rolados, magro e solo-cimento. |

QUADRO 06 - TIPOS DE CIMENTO PORTLAND CP II, % DE ADIÇÕES, APLICAÇÕES E USOS
FONTE: ABCP (2011)

De acordo com o SNIC (2010 a), 73% da produção nacional de cimento Portland foram comercializados em sacos de 50 kg e 27% à granel, isto é, atenderam grandes consumidores que produzem concreto em usinas. Ainda de acordo com o sindicato das indústrias cimentícias, os consumos regionais estiveram assim distribuídos:

- 49% Região Sudeste;
- 18% Região Nordeste;
- 16% Região Sul;
- 10% Região Centro-Oeste;
- 7% Região Norte.

Na América Latina, o Brasil é o maior produtor de cimento Portland com 51.747.000 toneladas, seguido pelo México com 35.100.000 t (SNIC, 2010 a).

2.5.2 Aditivos e adesivos

Lima (2009) demonstra os benefícios da adição de aditivos aos concretos de cimento Portland. A mistura de produtos aos concretos fresco, por meio da sua dissolução na água de amassamento contempla às características desses compósitos, desempenhos às solicitações a que são submetidos no ato da sua moldagem e durante a sua vida útil. Na indústria da construção a introdução de adesivos quer naturais ou artificiais incorporam as suas propriedades ao produto final, justificando o incremento de custo do produto final.

Comparativamente com a indústria madeireira, os produtos com a qualidade final desejável requerem o equilíbrio entre o menor consumo de adesivo, assim como é o objetivo dos produtores de chapas e elementos de madeira engenheirada é o objetivo e compromisso dos produtores da indústria da construção, ou seja, o atendimento das norma técnicas nacionais ou estrangeira e o desempenho final do produto LIMA, (2009).

A subjetividade da idéia de conforto segundo Schmid (2005), por outro lado requer após o exame criterioso das necessidades desejadas para o produto e, assim permita o seu encaminhamento para a produção industrial com o uso de todos os recursos tecnológicos possíveis e conhecidos, a fim da melhor adequação às situações de desempenho que esses materiais engenheirados utilizados no ambiente construído possam apresentar aos seus usuários.

2.6 COMPÓSITOS COM MADEIRA

Segundo Youngquist (1999), compósitos de madeira com produtos inorgânicos são produtos ou chapas que contém entre 10% e 70% em peso, de fibras de madeira e de 30% a 90 % de produto inorgânico. Propriedades aceitáveis desse tipo de compósito podem ser obtidas somente quando as partículas ou fibras de madeira são totalmente envolvidas com o material aglomerante, produzindo assim um painel mais homogêneo.

As pesquisas científicas na busca de conhecimento sobre a compatibilidade entre fibras vegetais e aglomerantes minerais são conduzidas por pesquisadores em todos os continentes e as dificuldades e as soluções para obtenção desses compósitos com custos, processos de produção, condicionamento e armazenamento que viabilizem a sua execução. As dificuldades de produção desse compósito se devem às características das espécies e ao regionalismo das madeiras utilizadas como agregados.

No Quadro 07 estão apresentados alguns pesquisadores e as suas contribuições no estado da arte, para o estudo e produção dos compósitos de madeira cimento.

| PESQUISADOR | CONTRIBUIÇÕES |
|---------------------------------|--|
| Beraldo <i>et al.</i> (2011) | Influência dos componentes químicos da matéria prima. |
| Evans (2011) Semple (2011) | Coletânea de processos de produção de madeira cimento da Ásia e região do Oceano Pacífico. |
| Fribort <i>et al.</i> (2008) | Relação entre geometria e disposição das partículas e resultados de parâmetros físico mecânicos. |
| Iwakiri (2005) | Processos de produção de madeira cimento. |
| Latorraca (2000) | Produção de painéis madeira cimento, inibição e aditivos. |
| Molesmi <i>et al.</i> (1983) | Incombustibilidade, resistência à umidade, água, fungos e insetos, isolantes térmicos e acústicos. |
| Savastano Jr (2011) | Resíduos de fibras vegetais escória de alto forno moída. |
| Simatupang e Gemer (1990) | Resistência de painéis. |
| Simatupang <i>et al.</i> (1991) | Aglomerantes minerais e processos para aumento de velocidade da cura do cimento. |
| Wolfe e Gjinolli (1996) | Tratamento aplicado às partículas. |

QUADRO 07 - PESQUISADORES E CONTRIBUIÇÕES APRESENTADAS PARA O ESTUDO DO COMPÓSITO MADEIRA CIMENTO

FONTE: O autor (2011)

No entanto, compósitos de madeira são sistemas multifásicos que incluem umidade, vazios e aditivos. Neste caso, a fibra da madeira é tomada como componente básico. Porém, a madeira por si só, pode ser considerada como um compósito natural uma vez que consiste de fibras aglutinadas pela lignina, que neste caso funciona como cola (MATOSKI, 2005).

As chapas tanto de cimento amianto como de cimento madeira tiveram um crescimento considerável na década de noventa. Como exemplo desse fato, Kuroki (1998) cita em seu artigo que, a produção dessas chapas passou de 5.000.000 m² em 1973 para 100.000.000 m² em 1993, isso apenas no Japão.

2.7 SISTEMAS CONSTRUTIVOS

Agopyam (2005) descreve que as mudanças nas últimas décadas vêm superando de maneira generalista e internacional os conceitos, os hábitos e os modelos seculares na construção civil entendida como um todo. Para esse autor, o avanço tecnológico nos últimos 50 anos incluiu a evolução do conhecimento e permite o emprego do termo indústria, para as atividades desenvolvidas no âmbito das construções habitacionais e comerciais realizadas pela engenharia civil, consolidando as vantagens da aplicação dos sistemas construtivos com auxílio das ferramentas eletrônicas de gerenciamento de projeto. Por outro lado, para Ceotto (2005), a Construção Civil de edifícios no Brasil foi um dos setores da economia onde houve pouco desenvolvimento nas últimas décadas, e não seria exagero afirmar que se constrói hoje como há trinta anos.

Para os praticantes do ofício de construtores, representados na pessoa do engenheiro, a linha de raciocínio de Helene (1999) recomenda que a sua formação durante o curso de graduação deve ser ampla, induzindo a novos conceitos de responsabilidade, que igualmente estender-se-ão a toda escala do processo produtivo da construção civil. O processo é lento e gradual, e para Lima (1995), as vantagens necessitam ser consolidadas, pois dependem de profunda mudança entre os envolvidos, ratificando Meseguer (1991) “comparativamente com outras indústrias a construção possui grande inércia às alterações”.

Paralelamente aos avanços da tecnologia as implicações decorrentes das imposições legais quanto a geração de resíduos se aperfeiçoaram em função da

Resolução Conama 307 (2012) conforme o Conselho Nacional do Meio Ambiente, que estabeleceu diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos sólidos da construção civil, disciplinando as ações necessárias de forma a minimizar os impactos ambientais. Em Curitiba, o Decreto nº 1068 de 18 de novembro de 2004 e a Lei Municipal nº 11682 de 06 de abril de 2006 implicam no plano de gerenciamento e destino desses resíduos sólidos, sem o qual os alvarás de construção não podem ser expedidos.

2.7.1 Caracterização de sistemas

Para Neufert (1974), o sistema construtivo condiciona à forma arquitetônica, porém há situações em que se liberta dessas restrições e atinge uma expressão mais evoluída quando ocorre a mudança de materiais, e assim, esse autor classifica os sistemas construtivos em:

- **Entrançados** - tais como os povos primitivos construía suas cabanas, usando técnicas de amarração, encordoando, entrançando e tecendo com ramagens. Foi nesse contexto que apareceram as abóbadas de berço a partir de feixe de varas ou canas curvadas amarradas. Mais tarde apareceu a construção em madeira, em todas as civilizações.
- **Em madeira** - onde existiam as florestas. Para locais com menor quantidade de madeira, os vãos eram preenchidos com janelas, e a estabilidade das construções era alcançada com contraventamentos diagonais de madeira, cruzados e preenchidos com outros materiais. Dessa técnica se derivou a concepção de sistema estrutural com montantes de madeira (*light wood frame*), e painéis pré fabricados de enchimento montados em estruturas preliminarmente executadas.
- **Em pedras** - irregulares empilhadas a seco, baixas, sem argamassa e posteriormente com o uso de argamassa possibilitaram paredes mais altas dando início a superposição de pavimentos.
- **Em concreto armado** - para edifícios altos, com normas técnicas exigentes quanto a confiabilidade estrutural, durabilidade e segurança ao fogo.

- **Em aço** - com a característica para vencer grandes vãos com formas leves, possibilidade de pré-fabricação, facilidade para ser desmontável possibilitando sua reutilização em outros locais ou a reciclagem após a sua demolição.

O Catálogo de Processos de Sistemas Construtivos para Habitação do IPT (1998) apresentou 25 alternativas de processos e sistemas construtivos existente no Brasil. Possui como objetivo a transferência de informações para os possíveis usuários, permitindo a redução do tempo necessário para a busca de soluções específicas. Segundo o IPT (1998), a particularidade que distingue as tentativas para a sistematização, em manuais já apresentados em publicações anteriores, e o catálogo por esse instituto apresentado se caracteriza pelo fato que, nos manuais anteriores, não estiveram o desempenho técnico do sistema construtivo avaliado e a utilização desse sistema construtivo aplicado em situações práticas.

Entretanto para Souza (2011), paredes maciças moldadas in loco com o emprego de vários tipos de concreto moldados por meio de formas de alumínio, de aço ou de material plástico, painéis pré-moldados em usinas ou em canteiros, paredes de concreto ou blocos cerâmicos, divisórias por painéis com componentes de origem mineral, fixados em montantes de aço, conhecidos como *light stell framing* e sistemas em alvenaria estrutural estão elencados em programas habitacionais brasileiros.

A fim de avaliar as vantagens e desvantagens desses sistemas construtivos, afirma Souza (2011) ser necessário analisar a melhor adequação de cada um, às condições em que será utilizado, examinando a sua exeqüibilidade, a exigência dos prazos que serão necessários para a construção, os custos de construção e manutenção, a garantia aos padrões de qualidade e atendimento às normas brasileiras de desempenho com integração da racionalização e a respectiva facilidade de montagem.

Na visão de Souza (2011), as preocupações com o meio ambiente não devem ser preteridas tendo em vista o impacto ambiental que essas atividades construtivas, embora sistematizadas, causam tanto em unidades isoladas quanto em conjuntos habitacionais.

Nesse sentido Ferreira (2010) e Thomaz (1992) propõem em seus trabalhos, que as avaliações nos sistemas construtivos inovadores sigam os requisitos para atender as expectativas quanto às exigências dos usuários, isto é, segurança, habitabilidade e durabilidade e as exigências quanto a exposição durante a vida útil, isto é, segurança estrutural e ao fogo, estanqueidade à água, desempenho térmico e acústico e desempenho dos sub sistemas, de água e esgotamento sanitário elétrico.

Encontra-se no Manual Técnico de Alvenaria da Associação Brasileira da Construção Industrializada (ABCI, 1990), a apresentação em forma coordenada, as informações técnicas para a produção de sistemas estruturais em alvenaria que até a data de sua publicação se encontravam de forma fragmentada. Com a contextualização prática das atividades de construção por meio do emprego de alvenaria quer em paredes de vedação ou fechamento, sem incidência de cargas estruturais, quer no emprego de alvenarias estruturais com blocos industrializados pré-moldados. O conteúdo desse manual demonstra a história e a prática do uso das vedações verticais no Brasil para a eficiência e racionalidade desse sistema construtivo (FERREIRA, 2010).

Para Anderson (1973), a possibilidade de construções com sistemas estruturais com uso de madeira, conhecido como *wood frame*, está condicionada a disponibilidade de madeiras e demais peças componentes auxiliares para o total da obra. O autor destaca ainda, a possibilidade da autoconstrução e recomenda os devidos cuidados protetivos com pinturas, contra agentes biodegradadores e ao fogo, pois lembra que, nos Estados Unidos da América existem ainda hoje construções de madeira com mais de duzentos anos.

O conhecimento das associações das técnicas construtivas, para Laroca (2007) concluiu em seu trabalho que há possibilidade do uso de materiais e mão de obra local, com a construção do modelo proposto para o seu estudo. Com isto, seria possível atender a demanda reprimida de habitações para populações com renda de até três salários mínimos, nas regiões produtoras de madeira de reflorestamento, por meio de utilização de sistemas construtivos com requisitos de qualidade controlada para o atendimento das normas de desempenho vigentes, conforme a norma NBR 15575 (ABNT, 2008) implantada a partir de 12 de maio de 2010, possibilitando o financiamento bancário deste tipo de unidades habitacionais.

2.7.2 Construção e CO₂

Gustavsson (2011) afirma em seu trabalho que, a introdução da madeira como material de construção proporciona a redução da emissão de CO₂ para atmosfera. A madeira como material de construção acredita Szücs (2010), de fonte renovável fecha o ciclo do carbono, estabelecendo o equilíbrio com o meio ambiente, e conclui que a cada período de 20 anos são estocadas 250 toneladas de carbono por hectare plantado.

O trabalho de Freitas Jr *et al.* (2010) apresentou o estudo de um edifício residencial com emprego de tecnologias convencionais, cuja contribuição para emissão foi de 205,33kg CO₂/m² de área construída, sem a consideração das emissões de CO₂ durante a fase de produção dos insumos necessários. Evidenciou ainda, os itens referentes aos fechamentos, isto é, para as alvenarias, a parcela relativa a estas emissões foram 30,1% de um total de 276.496 toneladas de CO₂ emitidas pela ação de construção daquele edifício. Apropriando-se das informações de Szücs (2010), para cada período de 20 anos, considerando-se uma produtividade média de 30 m³/ha/ano, armazena-se 250 toneladas de carbono por hectare de *Pinus* plantado, relacionando-se esse armazenamento ao edifício residencial com 14 apartamentos apresentado pelo trabalho de Freitas Jr *et al.* (2010) com 1.344 m² de área construída, a obra deixou o débito de 26.496 toneladas de CO₂ emitidos para a atmosfera, devido ao uso dos insumos de origem mineral e sua respectiva aplicação na indústria da construção civil.

3 INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL PRELIMINAR DOS MATERIAIS E MÉTODOS

A investigação preliminar da fonte de materiais para o compósito madeira cimento está associada à garantia de fornecimento dos insumos vegetais disponíveis. Segundo o relatório da ABRAF (2012) o Estado do Paraná detém plantios da espécie *Pinus*. O cultivo conta com a necessidade de desbastes e os troncos dessa espécie são direcionados para o seu aproveitamento industrial, podendo dessa forma, suprir a necessidade de cavacos a serem processados em faixas granulométricas compatíveis para seu emprego em compósito madeira cimento. Os galhos com suas cascas e acículas também foram direcionados para caracterização de sua faixa granulométrica para sua utilização na pesquisa do compósito.

3.1 CARACTERIZAÇÃO E PREPARO DOS AGREGADOS E DAS PARTÍCULAS VEGETAIS

Os cavacos vegetais utilizados neste estudo são procedentes da Madeireira Rio Verde situada no município de Tunas do Paraná. Essa indústria produz e comercializa este produto como biomassa, utilizando a espécie *Pinus* spp proveniente de florestas plantadas na região. A garantia de continuidade de fornecimento de material é o corte de árvores do primeiro desbaste, com até oito centímetros de Diâmetro à Altura do Peito (DAP), dos reflorestamentos. Três tipos de cavacos são produzidos. No processo industrial são reduzidos a cavacos, troncos descascados, galhos com casca e cavacos das cascas, todos resultante de ações mecânicas de descascadores e picadores. O controle da faixa granulométrica na indústria é feito por meio da abertura do ângulo de ataque das facas dos picadores.

Os cavacos de troncos e os cavacos de galhos provenientes da madeireira foram direcionados para Laboratório de Painéis da UFPR, e secos em estufa (3% de umidade).

Os cavacos de troncos e cavacos de galhos depois de caracterizados individualmente foram reduzidos pelo moinho de martelos. O processo de moagem

foi repetido duas vezes. As partículas provenientes dessas reduções foram direcionadas para a caracterização das faixas granulométricas na série de peneiras disponíveis para uso no laboratório. Para a elaboração dessas caracterizações foi necessário o ajuste no procedimento classificatório, para se adaptar à recomendação preconizada pela norma NBR 7211 (ABNT, 2005) sendo ambas as atividades desenvolvidas no Laboratório de Painéis da UFPR. As peneiras 32mm, 25mm e 6,5mm são da série intermediária e não entram no cálculo do módulo de finura

- Os cavacos de troncos apresentaram granulometria demonstrada no Quadro 08 e são a expressão da porcentagem retida na série de peneiras da norma NBR 7211 (ABNT, 2005), com seu respectivo módulo de finura MF 7,32.

| MALHA | mm | (%) RETIDA | (%) RETIDA ACUMULADA |
|------------------------------|-----------|-------------------|-----------------------------|
| Abertura | 32,0 | - | - |
| Abertura (intermediária) | 25,0 | 10,03 | 10,03 |
| Abertura | 19,0 | 32,23 | 42,26 |
| Abertura | 9,5 | 47,57 | 89,83 |
| Abertura (intermediária) | 6,3 | 10,10 | 99,93 |
| Módulo de finura (MF) | - | -- | 7,32- |

QUADRO 08 - PORCENTAGENS RETIDAS DOS CAVACOS DE TRONCOS E MÓDULO DE FINURA DOS CAVACOS NA INDÚSTRIA PROVENIENTES DO PICADOR

FONTE: O autor (2011)

- Os cavacos de galhos, igualmente provenientes da madeira, após secos em estufa (3% de umidade), apresentaram granulometria e respectivo módulo de finura MF 5,96 mostrado no Quadro 09.

| MALHA | mm | (%) RETIDA | (%) RETIDA ACUMULADA |
|------------------------------|-----------|-------------------|-----------------------------|
| Abertura | 19,0 | - | - |
| Abertura | 9,5 | 2,60 | 2,60 |
| Abertura (intermediária) | 6,3 | 63,10 | 65,33 |
| Abertura | 4,8 | 28,00 | 93,70 |
| Abertura | 2,4 | 6,30 | 100,00 |
| Módulo de finura (MF) | - | -- | 5,96- |

QUADRO 09 - PORCENTAGENS RETIDAS DOS CAVACOS DE GALHOS E MÓDULO DE FINURA DOS CAVACOS NA INDÚSTRIA PROVENIENTES DO PICADOR

FONTE: O autor (2011)

3.1.1 Partículas de Troncos e Partículas de Galhos

Os cavacos de troncos e cavacos de galhos depois de caracterizados individualmente foram reduzidos pelo moinho de martelos e, por meio da série de peneiras de acordo com a norma NBR 7211 (ABNT, 2005) foram classificados, sendo ambas as atividades desenvolvidas no Laboratório de Painéis da UFPR. O processo de moagem foi repetido duas vezes.

As duas faixas granulométricas de partículas que foram geradas para os cavacos de troncos denominaram-se partículas t1 e partículas t2, e sistematicamente duas faixas granulométricas para os cavacos de galhos denominadas de partículas g1 para a faixa granulométrica maior e partículas g2 para a faixa granulométrica menor, conforme apresentadas no Quadro 10. As partículas com menor granulometria foram geradas pela segunda passagem no moinho de martelos das partículas resultantes da primeira passagem das partículas pelo moinho de martelos.

| PASSAGEM PELO MOINHO DE MARTELOS | PARTÍCULAS DE <i>PINUS</i> spp |
|---|---------------------------------------|
| Primeira | g1 e t1 – (maior granulometria) |
| Segunda | g2 e t2 – (menor granulometria) |

QUADRO 10 - DENOMINAÇÃO DAS PARTÍCULAS DE *PINUS* spp

FONTE: O autor (2012)

a) As partículas t1 obtidas de cavacos de troncos depois de moídas encontraram na saída do moinho, a peneira com abertura da malha em 25 mm. Quando caracterizadas pela sua faixa granulométrica apresentaram o módulo de finura MF 5,67 e a faixa granulométrica mostrados na Figura 02.

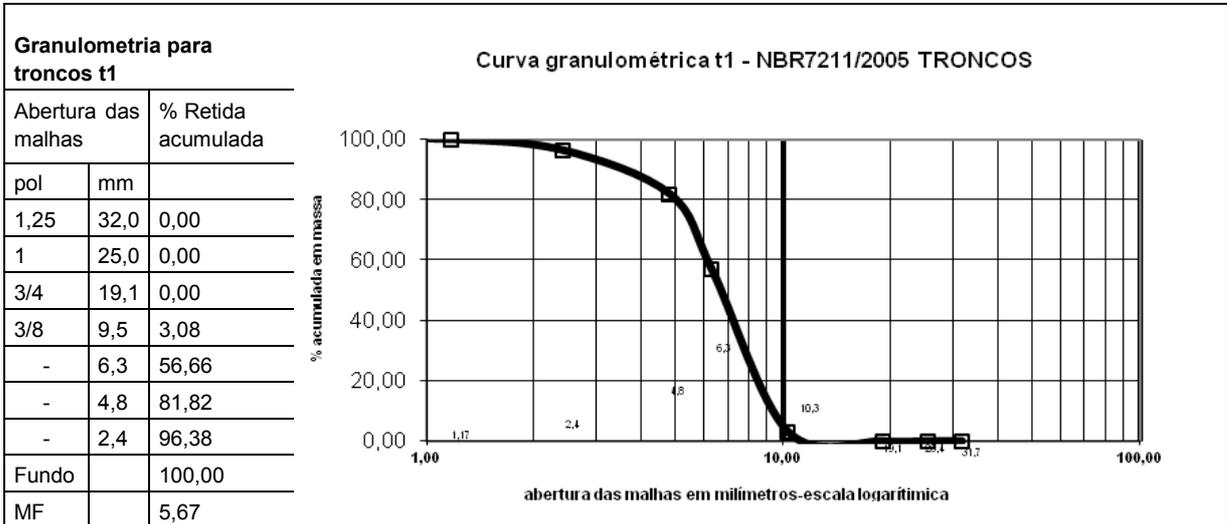


FIGURA 02 - FAIXA GRANULOMÉTRICA PARA PARTÍCULAS DE TRONCOS APÓS PRIMEIRA PASSAGEM PELO MOINHO DE MARTELOS
FONTE: O autor (2011)

As partículas obtidas de cavacos de troncos t1 foram novamente moídas no moinho de martelos que continha na sua saída a peneira com abertura da malha em 19 mm, gerando as partículas t2 com MF 5,33 e sua faixa granulométrica representada na Figura 03.

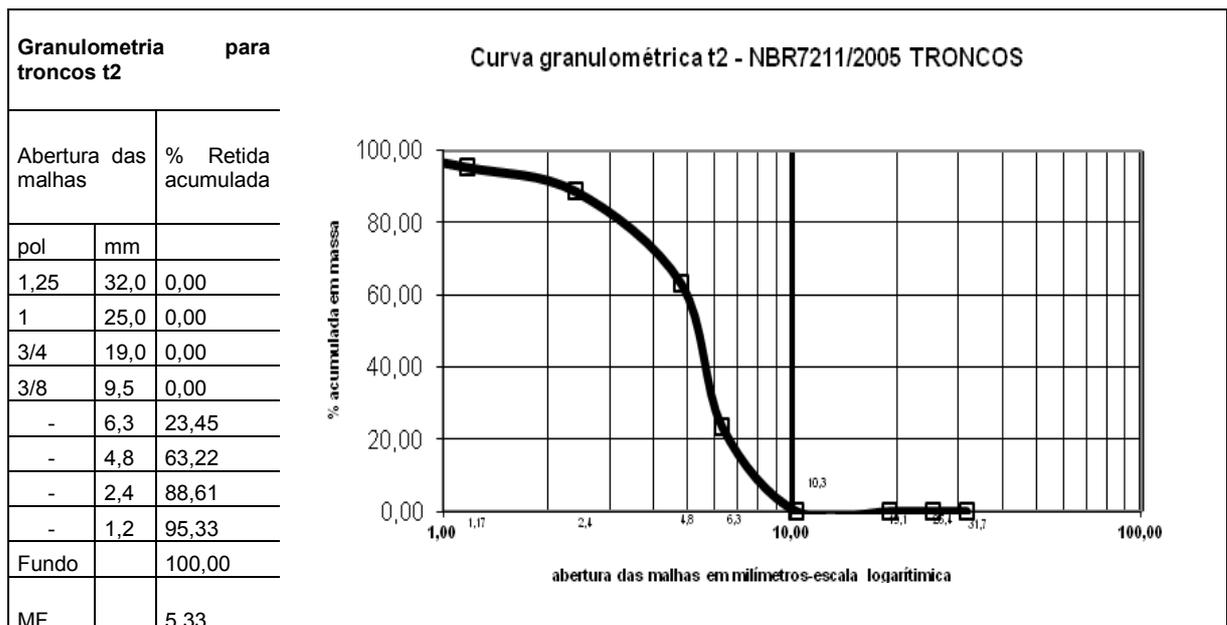


FIGURA 03 - FAIXA GRANULOMÉTRICA PARA PARTÍCULAS DE TRONCOS APÓS SEGUNDA PASSAGEM PELO MOINHO DE MARTELOS
FONTE: O autor (2011)

b) Para as partículas obtidas de cavacos de galhos foi repetido o mesmo procedimento de controle da faixa granulométrica adaptado segundo a norma NBR 7211 (ABNT, 2005). As partículas g1 provenientes de cavacos de galhos apresentaram módulo de finura MF 5,61 e a respectiva faixa conforme a Figura 04.

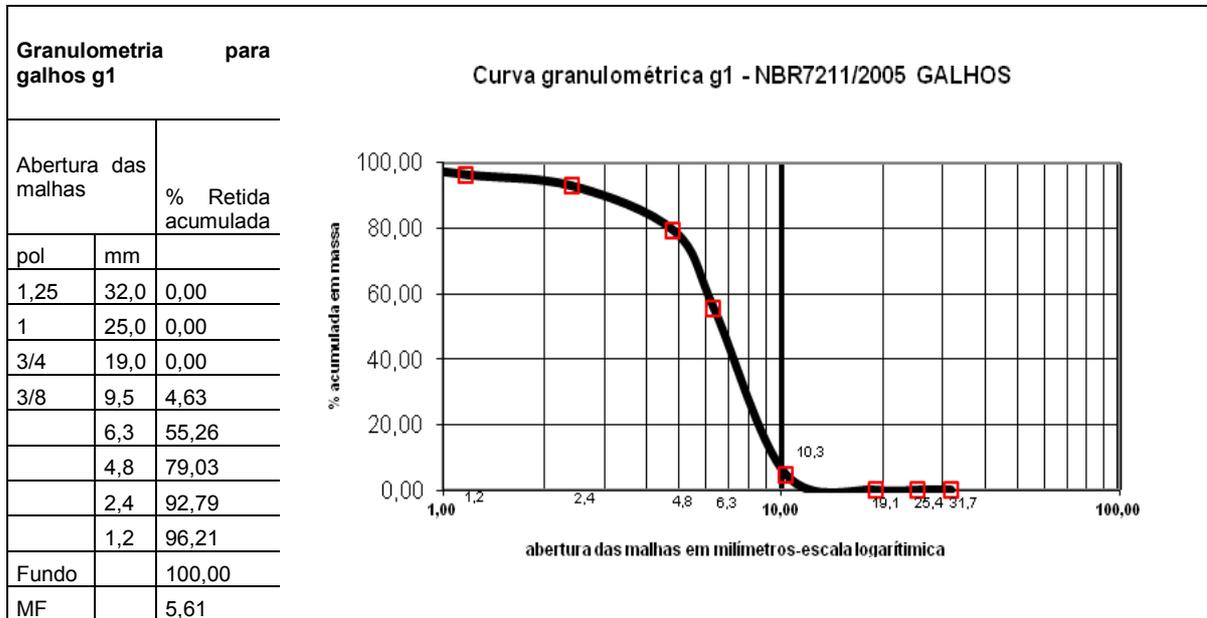


FIGURA 04 - FAIXA GRANULOMÉTRICA PARA PARTÍCULAS DE GALHOS APÓS PRIMEIRA PASSAGEM PELO MOINHO DE MARTELOS
 FONTE: O autor (2011)

As partículas g1 resultantes dos cavacos de galhos foram reconduzidas ao moinho de martelos gerando por meio da sua ação mecânica as partículas g2 de galhos com MF 5,14 com sua representação gráfica por meio da Figura 05.

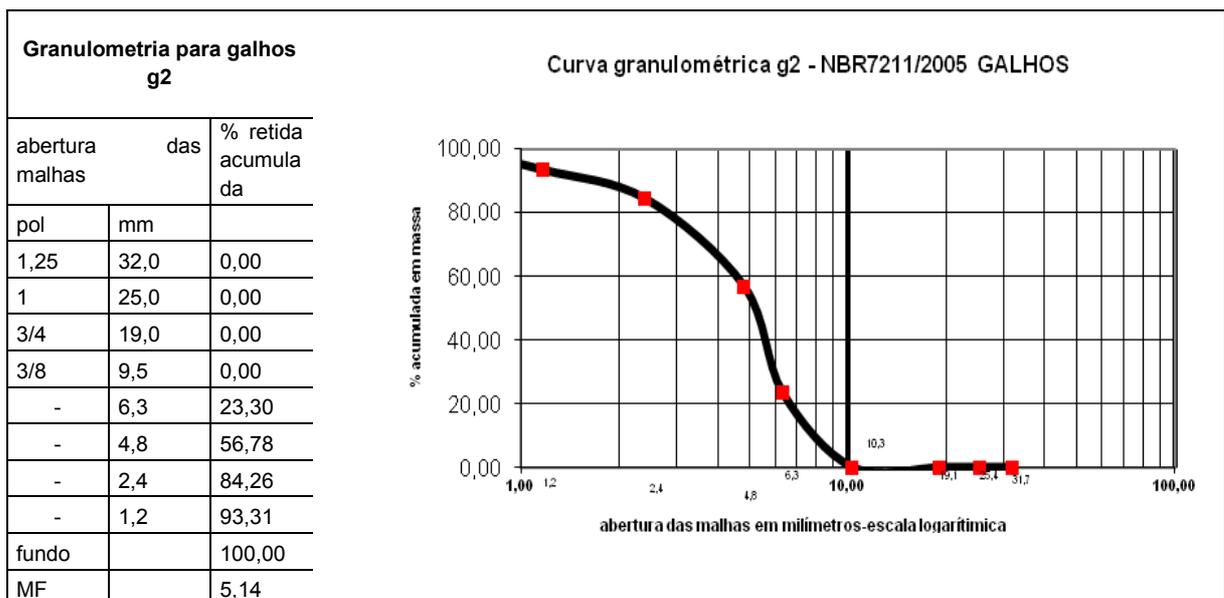


FIGURA 05 - FAIXA GRANULOMÉTRICA PARA PARTÍCULAS DE GALHOS APÓS SEGUNDA PASSAGEM PELO MOINHO DE MARTELOS
 FONTE: O autor (2011)

c) Para melhor caracterizar as faixas das curvas granulométricas das partículas vegetais, comparativamente com as curvas granulométricas dos agregados de origem mineral preconizado pela NBR 7211 (ABNT, 2005) foi inserido graficamente uma comparação, assim foi possível estabelecer o intervalo dessas faixas granulométricas. Essa comparação gráfica foi possível, pela inserção das faixas granulométricas encontradas nas ações de moagem das partículas de origem vegetal nas curvas envoltórias de classificação disponíveis para os agregados de origem mineral de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2005). Nessa comparação os agregados de origem vegetal foram classificados comparativamente, com os agregados de origem mineral como sendo pertencentes a faixa de agregados graúdos conforme o Gráfico 01.

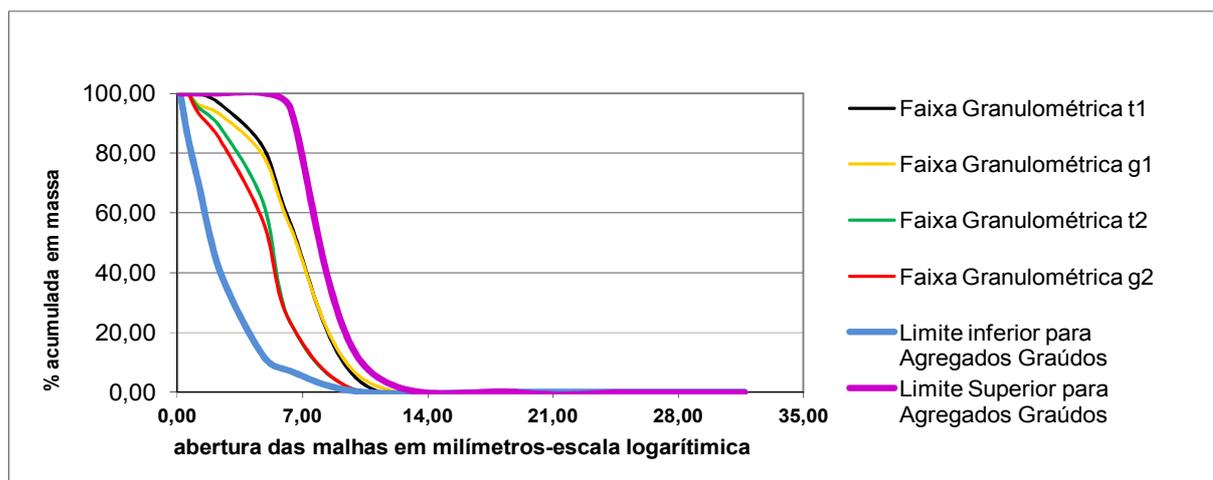


GRÁFICO 01 - FAIXAS GRANULOMÉTRICAS PARA PARTÍCULAS DE TRONCOS E GALHOS APÓS A PRIMEIRA E SEGUNDA PASSAGEM PELO MOINHO DE MARTELOS
 FONTE: O autor (2011)

3.1.2 Caracterização dos aglomerantes e aditivos

Para o presente trabalho considerando-se as características do cimento Portland tipo CP II – Z, com adição de cinzas pelo fabricante, a sua facilidade de aquisição e custo do produto, creditou-se a esse aglomerante a responsabilidade pela aglutinação das partículas de troncos e partículas de galhos do estudo.

Os aditivos orgânicos utilizados foram os superplastificantes e o aditivo conhecido como adesivo sintético modificado com polímeros aqui denominado de reforçadores de aderência entre a matriz cimentícia e as partículas.

No desenvolvimento de todo esse estudo sempre foi utilizado o cimento Portland CP II – Z, e entenda-se como tal, onde estiver escrito cimento Portland ou cimento C1 produzido pelo fabricante A ou cimento C2 produzido pelo fabricante B.

3.1.3 Caracterização dos elementos auxiliares

Os corpos de prova para elaboração dos ensaios foram de forma cilíndrica e de forma prismática em atendimento às recomendações às normas nacionais e às normas estrangeiras adaptadas, para os respectivos ensaios delineados nesse trabalho.

O equipamento para aplicação da carga dinâmica de compactação utilizado foi desenvolvido pelo pesquisador no Laboratório de Painéis da UFPR, a partir de um moto vibrador elétrico trifásico com ajuste mecânico dos excêntricos promotores da energia de vibração.

4 ESTUDO PROSPECTIVO EXPERIMENTAL DO USO DO CIMENTO PORTLAND PARA O DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITO DE MADEIRA CIMENTO MOLDADO COM AUXÍLIO DE COMPACTAÇÃO VIBRO DINÂMICA

4.1 RESUMO

Com conhecimentos disponibilizados por pesquisadores da ciência de produção de painéis de cimento madeira, quanto à adversidade do fenômeno da inibição, iniciou-se o estudo prospectivo, a partir de parâmetros de consumo mínimo de cimento. Por meio da prospecção experimental se objetivou encontrar parâmetros físicos e mecânicos com atributos qualitativos destinados a iniciar o estudo do compósito madeira cimento. Nessa fase foram utilizadas partículas provenientes de galhos e troncos de *Pinus* spp com granulometria conhecida e o cimento Portland para aglutinação das partículas. A metodologia empregou o pré-tratamento às partículas, fez uso de duas dosagens de cimento, do consumo de água e dos aditivos da construção civil e pesquisou formatos geométricos de moldes para obtenção do compósito obtido por meio do adensamento por vibro compactação mecânica. Com a evolução dos resultados durante as séries prospectivas desse trabalho, as análises das avaliações qualitativas e quantitativas demonstraram a possibilidade de elaboração do compósito madeira cimento com atributos como a facilidade de trabalhabilidade em estado fresco e a velocidade do início de pega da matriz cimentícia e demonstraram ainda, adesão interna, resistência ao esboroamento e resistência ao esforço manual de torção. Quanto aos resultados apresentados pelos ensaios mecânicos do compósito destacou-se a resistência a compressão, considerando-se a baixa densidade aparente do compósito devido aos vazios presentes entre as partículas.

4.2 INTRODUÇÃO

No exterior, o uso do compósito madeira cimento como elemento pré fabricado para aplicação na indústria da construção civil e elemento de proteção e conforto ambiental é reconhecido. Na Alemanha, na Áustria e no Leste Europeu, de acordo com Fribort *et al.* (2011) é produzido em grande escala; na Rússia o seu incremento de produção na década de 1990 segundo Tsypin (1998) foi acentuado; na América do Norte, especialmente no Canadá onde se situam fábricas para a produção deste material para exportação para países da Ásia; no Japão, Kuroki (1998) aponta o incremento do seu uso devido aos sistemas construtivos desenvolvidos naquele país requerido pelas normas japonesas de segurança, resistência ao fogo e à ação dos terremotos.

No Brasil, segundo Matoski (2005) na região Sul, onde se apresenta a combinação do clima e das correntes imigratórias procedentes de países onde a técnica já era conhecida levaram a instalação de algumas fábricas de painéis de madeira cimento. Composta de fibras longas de madeira, prensadas com condicionamento sob grampeamento e com cimento especiais foram esses materiais desenvolvidos, para a utilização como forros e divisórias com atributos de proteção térmica e acústica, além da facilidade do processo de montagem. Esse material é produzido no Brasil, na cidade de Blumenau em Santa Catarina. Iwakiri e Prata (2007) acreditam que o emprego de painéis de madeira cimento pode ocupar o seu espaço na construção civil, desde que ocorram iniciativas para seu uso. Ainda segundo esses pesquisadores, já contribuem para a consolidação desse compósito, a auto-suficiência do país em aglomerantes de origem mineral e a grande disponibilidade de resíduos do processamento da madeira.

A indústria cimentícia brasileira está capacitada a entregar ao mercado consumidor, quando em condições normais, diversos tipos de cimento Portland, em conformidade com as normas vigentes de controle da produção, na região sul do país estão disponíveis alguns dos cimentos com adições permitidas pela ABNT. As adições segundo a ABCP (2011) proporcionam melhoria nas características dos compósitos que utilizam o cimento como aglomerante e preservam o meio ambiente por reduzir a pressão extrativista de matéria prima para a produção do cimento Portland.

Entretanto acredita-se que devido às características da construção civil no Brasil, a implantação de novos meios e processos construtivos, como é o caso do compósito madeira cimento, depende de mudanças. A atividade de construção quer empresarial ou particular, possui resistência às mudanças dos paradigmas nos processos construtivos (SOUZA; MEKBEKIAN, 1996). Para produção do compósito a ser estudado e possivelmente para o encaminhamento do seu aceite no meio da construção, seria necessária facilidade de execução do preparo da mistura do compósito, assim como a sua instalação no canteiro de obras.

Há necessidade do domínio das técnicas de processamento do compósito, como se faz com as argamassas minerais, dentro do próprio canteiro de obra de construções, com a mão de obra e a qualificação profissional, como é atualmente usada no preparo do concreto de cimento Portland, atividade exercida por todas as pequenas e médias construtoras, incluindo as construções particulares. Segundo o relatório anual do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento, SNIC (2010 a), 70% da produção nacional de cimento foram destinadas a revendedores que a comercializaram em forma de sacos. Abasteceram os consumidores particulares e as construtoras que via de regra empregam esse aglomerante mineral e processam o concreto de cimento Portland dentro do próprio canteiro de obras e aguardam o decorrer de 28 dias de prazo para alcançar as resistências mecânicas características de projeto.

Desenvolveu-se esse trabalho com o objetivo de prospectar experimentalmente por meio de avaliações qualitativas e quantitativas dos corpos de prova moldados, a possibilidade do uso do cimento Portland para o desenvolvimento de compósito de madeira cimento moldados com auxílio de compactação vibro dinâmica.

4.2.1 Objetivo

Com a utilização de partículas de troncos e partículas de galhos de *Pinus* spp objetivou-se encontrar parâmetros que traduzissem as características físicas e mecânicas de um compósito madeira cimento de baixa densidade, moldado, não prensado, em corpos de prova utilizando-se como aglomerante o cimento Portland.

4.2.2 Objetivo específico

Prospectar experimentalmente por meio de avaliações qualitativas e quantitativas o uso de pré-tratamentos aplicado às partículas de *Pinus* spp, do cimento Portland, a ação de aditivos plastificantes e reforçadores de aderência empregados na construção civil e o método de compactação vibro dinâmica para o desenvolvimento de compósito de madeira cimento.

4.3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para se conduzir o início de uma prospecção da possibilidade do desenvolvimento de um compósito de madeira cimento foi necessária a elaboração de um mapa conceitual a fim de proporcionar o entendimento das cinco séries de tratamentos das amostras de estudo a serem trabalhadas, dependentes das condicionantes hipóteses para o estudo prospectivo preliminar de um compósito madeira cimento simplificado no mapa conceitual e representado na Figura 06.

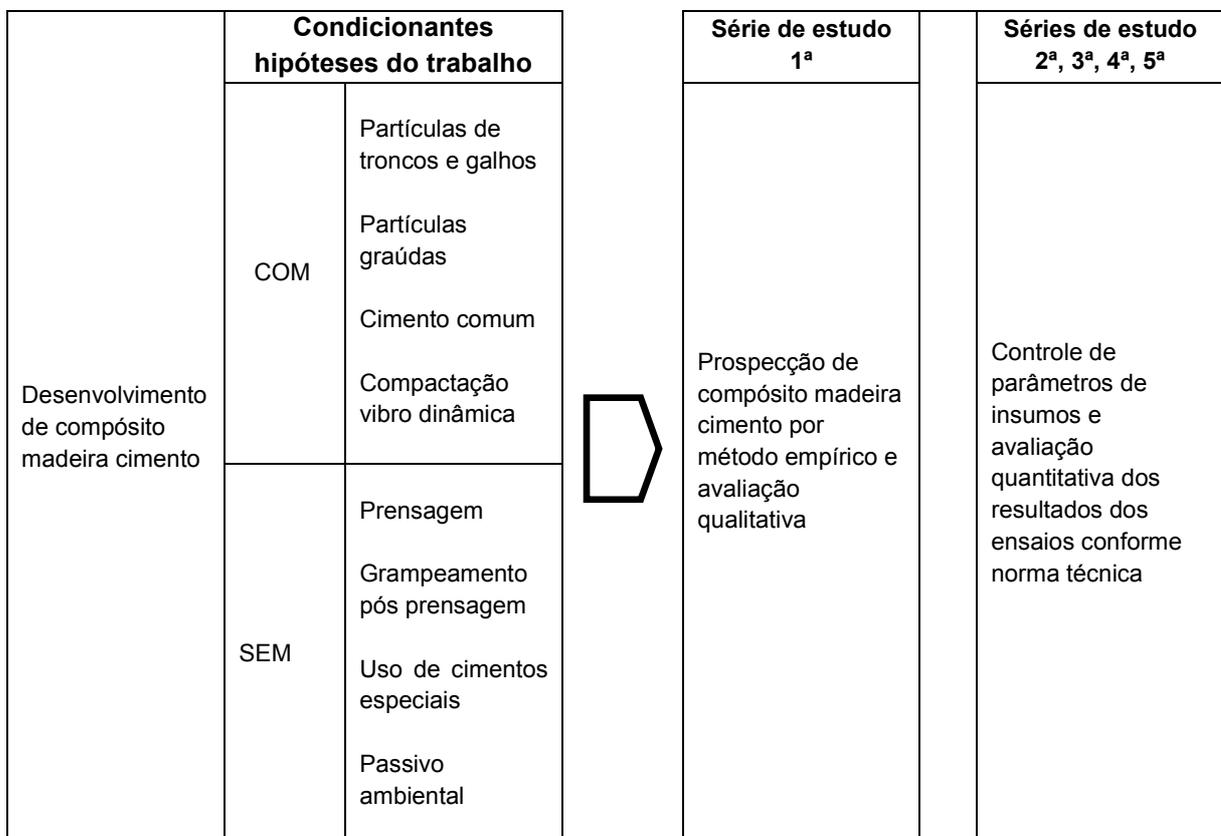


FIGURA 06 - MAPA CONCEITUAL PARA O ESTUDO EXPLORATÓRIO DO COMPÓSITO MADEIRA CIMENTO

FONTE: O autor (2011)

4.3.1 Materiais

▪ Cavacos de Troncos e Cavacos de Galhos de *Pinus spp*

Nesse trabalho foram utilizados cavacos de troncos e cavacos de galhos com procedência conhecida e com garantia da quantidade de fornecimento, provenientes de florestas plantadas no Município de Tunas do Paraná, processadas pela Madeireira Rio Verde, com a finalidade comercial. Os cavacos de troncos e galhos, quando recebidos no laboratório se apresentaram respectivamente com módulo de finura (MF) iguais a 7,32 e 5,96 depois de submetidos à série de peneiras, de acordo com a norma NBR 7211 (ABNT, 2005), adaptada. Depois de secos em estufa no Laboratório de Painéis da UFPR e uma umidade residual de 3%, foram então processados duas vezes no moinho de martelos para obtenção das partículas.

Para a prospecção preliminar foram utilizadas as partículas vegetais dentro das faixas granulométricas apresentadas pela Tabela 02.

TABELA 02 - DIMENSÕES DAS SÉRIES DE PENEIRAS, GRANULOMETRIAS E MÓDULO DE FINURA DAS PARTÍCULAS PARA TRONCOS E GALHOS, APÓS DUAS REDUÇÕES NO MOINHO DE MARTELOS

| Granulometria para troncos t1 | | | Granulometria para galhos g1 | | | Granulometria para troncos t2 | | | Granulometria para galhos g2 | | |
|-------------------------------|------|--------------------|------------------------------|------|--------------------|-------------------------------|------|--------------------|------------------------------|------|--------------------|
| Abertura das malhas | | % Retida acumulada | Abertura das malhas | | % Retida acumulada | Abertura das malhas | | % Retida acumulada | Abertura das malhas | | % Retida acumulada |
| pol | mm | | pol | mm | | Pol | mm | | pol | mm | |
| 1,25 | 32,0 | 0,00 | 1,25 | 32,0 | 0,00 | 1,25 | 32,0 | 0,00 | 1,25 | 32,0 | 0,00 |
| 1 | 25,0 | 0,00 | 1 | 25,0 | 0,00 | 1 | 25,0 | 0,00 | 1 | 25,0 | 0,00 |
| ¾ | 19,0 | 0,00 | ¾ | 19,0 | 0,00 | ¾ | 19,0 | 0,00 | ¾ | 19,0 | 0,00 |
| 3/8 | 9,5 | 3,08 | 3/8 | 9,5 | 4,63 | 3/8 | 9,5 | 0,00 | 3/8 | 9,5 | 0,00 |
| - | 6,3 | 56,66 | - | 6,3 | 55,26 | - | 6,3 | 23,45 | - | 6,3 | 23,30 |
| - | 4,8 | 81,82 | - | 4,8 | 79,03 | - | 4,8 | 63,22 | - | 4,8 | 56,78 |
| - | 2,4 | 96,38 | - | 2,4 | 92,79 | - | 2,4 | 88,61 | - | 2,4 | 84,26 |
| - | 1,2 | 96,38 | - | 1,2 | 96,21 | - | 1,2 | 95,33 | - | 1,2 | 93,31 |
| Fundo | - | 100,00 | Fundo | - | 100,00 | Fundo | - | 100,00 | Fundo | - | 100,00 |
| MF | | 5,67 | MF | | 5,61 | MF | | 5,33 | MF | | 5,14 |

FONTE: O autor (2011)

Na primeira passagem pelo moinho de martelos para redução da dimensão dos cavacos de troncos e galhos com a peneira de 25 mm na saída da ação de moagem, foram obtidas as partículas de troncos (t1) e as partículas de galhos (g1), e estas apresentaram respectivamente os módulos de finura (MF) iguais a 5,67 e 5,61.

Na segunda moagem, as partículas apresentaram os módulos de finura (MF) iguais a 5,33 e 5,14 respectivamente, para partículas de troncos (t2) e partículas de galhos (g2) com uma peneira de 19 mm na saída do moinho.

As curvas das faixas granulométricas das partículas representadas no Gráfico 01, a seguir e comparadas, entre si, classificam-se em agregados graúdos de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2005). Observa-se que as faixas granulométricas apresentadas por essas partículas decorrentes dos processos de moagem, inseriram-se dentro dos limites contidos em curvas padronizadas pela NBR 7211 (ABNT, 2005) que representam a classificação, dentro desse intervalo, como agregados graúdos, quando em comparação com os agregados de origem mineral.

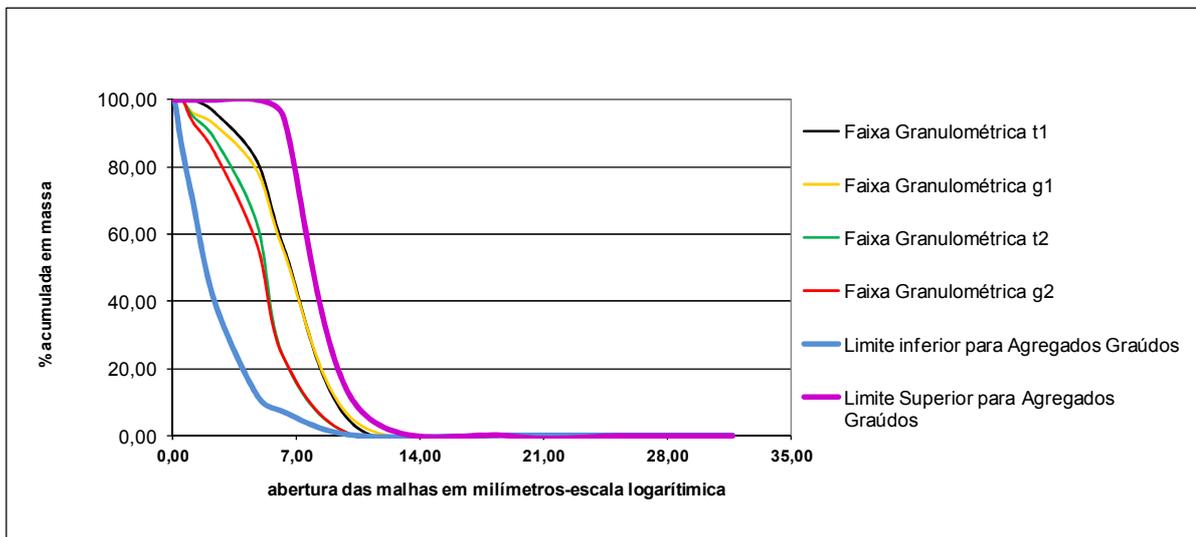


GRÁFICO 01 - FAIXAS GRANULOMÉTRICAS PARA PARTÍCULAS DE TRONCOS E GALHOS APÓS A PRIMEIRA E SEGUNDA PASSAGEM PELO MOINHO DE MARTELOS
 FONTE: O autor (2011)

▪ Aglomerantes e aditivos

O trabalho explorou a possibilidade do desenvolvimento de um novo procedimento de obtenção de compósitos de madeira cimento estando as misturas iniciais amparados pela NBR 8953 (ABNT, 2009) no grupo 1 e classe C10, isto é, resistência característica dos compósitos à compressão até a tensão de 10MPa. Esse cimento é de fácil aquisição, devido ao seu custo, conhecido como cimento Portland CP II – Z, produzido pelo fabricante A, e conta com disponibilidade permanente no mercado de materiais para a construção civil. Foi incluída no estudo

a possibilidade do uso de plastificantes com origem em lignosulfonados, como aditivo que, misturado a água de amassamento proporciona a diminuição da tensão superficial da pasta de cimento. Como exploração foi estudada ainda, o efeito do hidróxido de cálcio, substância química, sobre as partículas de madeira como pré tratamento, conhecido na construção civil como pasta de cal, preparada a partir do óxido de cálcio ou cal virgem, no laboratório onde foram desenvolvidos os trabalhos de prospecção.

4.4 METODOLOGIA APLICADA

O estudo foi iniciado prospectando-se um processo próprio para desenvolvimento da pesquisa de um compósito madeira cimento prevendo-se avaliações qualitativas e quantitativas. Essas avaliações foram delineadas em cinco séries de tratamentos de amostras conforme plano experimental apresentado na Tabela 03.

TABELA 03 - PLANO EXPERIMENTAL PARA O ESTUDO PROSPECTIVO DO COMPÓSITO MADEIRA CIMENTO – FATOR ÁGUA CIMENTO 0,5

| SÉRIE DE AMOSTRAS | Tratamento | INSUMOS | | | | | | | | Norma técnica adaptada aplicada para o ensaio | PRÉ-TRATAMENTO APLICADO À PARTÍCULA | | | | | | CP |
|-------------------|----------------|---------|--------|-------------|----------|----------------------|-------------------|----------------|-------------|---|-------------------------------------|---------|---------|-------|---------------------|--------------|----|
| | | Troncos | Galhos | Cimento (g) | Água (g) | Correção de água (g) | Plastificante (g) | Reforçador (g) | Secas ao ar | | Água | Lavadas | imersas | úmida | Hidróxido de cálcio | Número de CP | |
| 1 ^a | T ₁ | t1 | | 150 | 75,0 | N | N | N | N | S | N | N | N | N | N | 16 | |
| | T ₂ | t1 | | 175 | 87,5 | N | N | N | N | S | N | N | N | N | N | 16 | |
| | T ₃ | | g2 | 175 | 87,5 | N | 4,37 | N | N | S | N | N | N | N | N | 16 | |
| | T ₄ | | g2 | 175 | 87,5 | N | N | N | N | N | N | N | S | S | S | 16 | |
| 2 ^a | T ₁ | | g2 | 175 | 87,5 | 26,25 | 4,37 | N | ABNT | S | S | S | S | N | N | 10 | |
| | T ₂ | | g2 | 175 | 87,5 | 26,25 | 4,37 | N | ABNT | S | N | S | S | N | S | 10 | |
| | T ₃ | | g1 | 175 | 87,5 | 26,25 | 4,37 | N | ABNT | S | N | N | S | N | S | 10 | |
| 3 ^a | T ₁ | | g2 | 175 | 58,3 | 17,5 | 5,25 | 37,9 | ABNT | S | S | S | S | N | N | 10 | |
| | T ₂ | | g2 | 175 | 58,3 | 17,5 | 5,25 | 37,9 | ABNT | S | N | S | S | N | S | 10 | |
| | T ₃ | | g2 | 175 | 58,3 | 17,5 | 5,25 | 37,9 | ABNT | S | N | N | S | N | S | 10 | |
| | T ₄ | | g2 | 175 | 87,5 | 26,25 | N | N | ABNT | N | N | N | S | S | S | 10 | |
| 4 ^a | T ₁ | t1 | | 175 | 58,3 | 17,5 | 5,25 | 37,9 | ABNT | S | N | N | S | N | S | 10 | |
| | T ₂ | | g1 | 175 | 58,3 | 17,5 | 5,25 | 37,9 | ABNT | S | N | N | S | N | S | 10 | |
| | T ₃ | t2 | | 175 | 58,3 | 17,5 | 5,25 | 37,9 | ABNT | N | N | N | S | S | S | 10 | |
| | T ₄ | | g2 | 175 | 58,3 | 17,5 | 5,25 | 37,9 | ABNT | N | N | N | S | S | S | 10 | |
| 5 ^a | T ₁ | | g2 | 175 | 58,3 | 17,5 | 5,25 | 37,9 | ASTM | S | N | N | S | N | S | 4 | |

FONTE: O autor (2011)

LEGENDA: S: Sim; N: Não

NOTA: Os insumos estão apresentados para 0,5 dm³ do compósito madeira cimento

4.4.1 Primeira Série de amostras com avaliação qualitativa

A primeira série de amostras que continha quatro tratamentos T1, T2, T3 e T4 foram preparadas com a quantidade de $0,5 \text{ dm}^3$ das partículas vegetais e com as faixas granulométricas t1 de partículas de troncos para os tratamentos T1 e T2 e a faixa granulométrica g2 de partículas de galhos para os tratamentos T3 e T4. As faixas granulométricas escolhidas fundamentaram-se na necessidade de obter informações sobre o comportamento do compósito com partículas contidas em situações diferentes, isto é, com a presença do lenho e com a presença de cascas e acículas. Durante o exercício do processo de prospecção foram modificadas as quantidades dos componentes dos insumos, aglomerantes e por consequência a água de amassamento e respectivo fator água cimento.

4.4.1.1 Tratamento T1 com partículas de tronco t1

O primeiro tratamento foi produzido com partículas de tronco t1 e com o emprego do cimento Portland CP II - Z em $300\text{g}/\text{dm}^3$ (trezentos gramas de cimento por decímetro cúbico composto de compósito). Na dosagem dos agregados adotou-se a medida em volume e na dosagem do cimento em peso, pois esse é o procedimento empregado em obras de construção civil.

A investigação das dosagens preliminares conforme a Tabela 03 (p. 64) consumiu 150g de cimento Portland e $0,5\text{dm}^3$ de insumos vegetais. As partículas vegetais soltas foram misturadas com a pasta de cimento, preparada com 75g de água e 150g de cimento, sendo o compósito vertido em uma forma de molde de papelão impermeável, com o formato de um bloco de paralelepípedo com o volume equivalente a $0,5\text{dm}^3$ nas dimensões de 16,5 cm X 6,5 cm x 4,66, cm conforme Figura 07 (A) a seguir.



(A)



(B)

FIGURA 07 - MOLDE DO CORPO DE PROVA (A) E APARELHO DE VIBRO COMPACTAÇÃO DINÂMICA (B)

FONTE: O autor (2011)

A ordem da mistura dos ingredientes aconteceu colocando-se as partículas vegetais sobre a pasta de cimento Portland. A dosagem da pasta de cimento Portland obtida a partir das pesagens dos seus componentes foi misturada manualmente com antecedência, permitindo que as partículas fossem colocadas sobre a pasta. Com auxílio de um aparelho moto vibrador dinâmico, Figura 07(B) gerando a energia dinâmica vibratória de 22 daN, executou-se a ação de adensamento por compactação vibro dinâmica do compósito de madeira cimento no interior das formas dos moldes durante o tempo de 90 segundos divididos em três estágios de 30 segundos cada um.

4.4.1.2 Tratamento T2 com partículas de tronco t1 e acréscimo de cimento

O segundo tratamento T2 para obtenção de novos corpos de prova, com o mesmo preparo do tratamento T1, foi alterado o parâmetro do consumo do aglomerante sendo aumentada a quantidade de cimento Portland e foram mantidos os demais parâmetros para o consumo dos insumos.

O segundo tratamento T2 foi produzido com partículas de tronco t1 e com o emprego do cimento Portland em $350\text{g}/\text{dm}^3$ (trezentos e cinquenta gramas de cimento por decímetro cúbico) de compósito. Na dosagem dos agregados adotou-se a medida em volume e na dosagem do cimento em peso.

A investigação das dosagens preliminares conforme Tabela 03 (p. 64), consumiu 175g de cimento Portland e $0,5\text{dm}^3$ de insumos vegetais. As partículas

vegetais soltas foram misturadas com a pasta de cimento, preparada com 87,5g de água e 175g de cimento, sendo o compósito vertido em uma forma de molde de papelão impermeável, com o formato de um bloco de paralelepípedo com o volume equivalente a $0,5\text{dm}^3$ nas dimensões de 16,5cm X 6,5cm x 4,66cm, Figura 07 (A) (p. 66). A ordem da mistura dos ingredientes aconteceu colocando-se as partículas vegetais sobre a pasta de cimento Portland. A dosagem da pasta de cimento Portland obtida a partir das pesagens dos seus componentes foi misturada manualmente com antecedência, permitindo que as partículas fossem colocadas sobre a pasta. Os moldes tiveram o total do seu volume preenchido com o compósito em estado fresco. Com auxílio de um aparelho moto vibrador dinâmico Figura 07 (B) (p. 66) gerando a energia dinâmica vibratória executou-se a ação de adensamento por compactação vibro dinâmica do compósito de madeira cimento no interior das formas dos moldes.

4.4.1.3 Tratamento T3 com partículas de galhos g2 com aditivo

O terceiro tratamento prospectado T3 foi produzido com partículas de galhos g2 e com o emprego do cimento Portland, e foi adicionado ao compósito preparado igualmente ao tratamento T2, um aditivo comercial conhecido como plastificante para concretos. Os componentes ativos dos aditivos plastificantes derivam de lignosulfonados. O produto aditivo foi utilizado com dosagem recomendada de 0,25% do peso do cimento, para manutenção do fator água cimento dentro do parâmetro 0,50 idêntico para os concretos de cimento com agregados minerais, proporcionando trabalhabilidade à mistura e facilidade de moldagem, e adaptado para o estudo do compósito com agregados de origem vegetal.

O terceiro tratamento T3 foi produzido com partículas de galhos g2 e com o emprego do cimento Portland em $350\text{g}/\text{dm}^3$ (trezentos e cinquenta gramas de cimento por decímetro cúbico) de compósito.

A investigação das dosagens preliminares conforme Tabela 03 (p.64), consumiu 175g de cimento e $0,5\text{dm}^3$ de insumos vegetais. As partículas vegetais soltas foram misturadas com a pasta de cimento, preparada com 87,5g de água, 175g de cimento e com 4,37g de aditivo superplastificante correspondente ao teor de dosagem de 2,5% sobre o peso do cimento .

O compósito foi vertido em uma forma de molde de papelão impermeável com o formato de um bloco de paralelepípedo com o volume equivalente a $0,5\text{dm}^3$ nas dimensões de $16,5\text{cm} \times 6,5\text{cm} \times 4,66\text{cm}$ conforme Figura 08 (A) e (B).



(A)



(B)

FIGURA 08 - FORMA E CORPOS DE PROVA COM PARTÍCULAS g1 E t1 (A)
FORMA E CORPO DE PROVA COM PARTÍCULAS g1 (B)
FONTE: O autor (2011)

A ordem da mistura dos ingredientes aconteceu colocando-se as partículas vegetais sobre a pasta de cimento Portland. A dosagem da pasta de cimento Portland obtida a partir das pesagens dos seus componentes foi misturada manualmente com antecedência, permitindo que as partículas fossem colocadas sobre a pasta. Os moldes tiveram o total do seu volume preenchido com o compósito em estado fresco. Com auxílio de um aparelho moto vibrador dinâmico apresentado na Figura 09 gerando a energia dinâmica vibratória, executou-se a ação de adensamento por vibro compactação do compósito de madeira cimento no interior das formas dos moldes.



FIGURA 09 - ELEMENTO VIBRADOR ELÉTRICO DE 3.000 RPM
FONTE: O autor (2011)

4.4.1.4 Tratamento T4 com partículas de galhos g2 sem aditivo e com hidróxido de cálcio

O quarto tratamento T4 foi produzido com partículas de galhos g2 e com o emprego do cimento Portland CP II – Z. Foi decorrente da hipótese proveniente das ações desenvolvidas nas fases antecedentes de prospecção do compósito, dispensando-se a presença do aditivo plastificante e considerando-se uma possível nova composição de mistura para os compósitos.

Para o preparo desse compósito, as partículas vegetais de galhos g2 secas foram pré-tratadas em solução de hidróxido de cálcio. Para tanto, duas fases de mistura se fizeram necessárias, sendo uma o preparo da solução de hidróxido de cálcio e a outra o pré-tratamento das partículas vegetais:

- Na primeira fase, o hidróxido de cálcio foi obtido por meio do preparo de uma solução contendo 1600 g de óxido de cálcio, com grau de pureza de 80%, para cada $6,0 \text{ dm}^3$ de água. Terminada a reação exotérmica obteve-se a solução de hidróxido de cálcio na relação 4,7:1 (quatro vírgula sete partes de água para uma parte de óxido de cálcio, em massa) que ficou em processo de complementação da reação e resfriamento por vinte e quatro horas em temperatura ambiente.

- Na segunda fase, o pré-tratamento para se obter o envolvimento das partículas vegetais para o preparo do compósito, foi utilizado 75g da solução de hidróxido de cálcio para $0,5 \text{ dm}^3$ de partículas vegetais g2 por meio de uma mistura manual. As partículas que receberam o pré-tratamento, imediatamente foram misturadas à pasta de cimento.

O quarto tratamento T4 foi produzido com partículas de galhos g2 e com o emprego do cimento Portland em $350\text{g}/\text{dm}^3$ (trezentos e cinquenta gramas de cimento por decímetro cúbico) de compósito. Na dosagem dos agregados adotou-se a medida em volume e na dosagem do cimento em peso.

A investigação das dosagens preliminares conforme Tabela 03 (p.64), consumiu 175g de cimento Portland CP II - Z e $0,5\text{dm}^3$ de insumos vegetais. As partículas vegetais soltas foram misturadas com a pasta de cimento, preparada com 87,5g de água e 175g de cimento, sendo o compósito vertido em uma forma de molde, de papelão impermeável, com o formato de um bloco de paralelepípedo com o volume equivalente a $0,5\text{dm}^3$ nas dimensões de 16,5cm X 6,5cm x 4,66cm.

Novas observações foram possíveis, pois durante essa exploração, da mesma forma como nos tratamentos anteriores sempre foram reservados oito corpos de prova, para cada tratamento, para que mesmo antes da ocorrência dos prazos de cura pudessem ser manuseados, demonstrando de forma simples, visual e tátil a evolução do comportamento de cura do compósito produzido experimentalmente.

Os insumos utilizados e os pré-tratamentos aplicados às partículas para a composição do compósito madeira cimento prospectado na Primeira Série Amostras estão apresentados no Quadro 11 e o pré-tratamento aplicado no Quadro 12.

| TRATAMENTO PARTICULAS | | T1 (t1) | T2 (t1) | T3 (g2) | T4 (g2) |
|-----------------------|----------------------|---------|---------|---------|---------|
| INSUMOS | Cimento (g) | 150,0 | 175,0 | 175,0 | 175,0 |
| | Água (g) | 75,0 | 87,5 | 87,5 | 87,5 |
| | Correção de água (g) | N | N | N | N |
| | Plastificante (g) | N | N | 4,37 | N |
| | Reforçador (g) | N | N | N | N |
| | Norma para ensaio | N | N | N | N |

QUADRO 11 - INSUMOS UTILIZADOS NA PRIMEIRA SÉRIE DE AMOSTRAS

FONTE: O autor (2011)

LEGENDA: S: Sim; N: Não

NOTA: Os insumos estão apresentados para 0,5 dm³ do compósito madeira cimento

| TRATAMENTO PARTICULAS | | T1 (t1) | T2 (t1) | T3 (g2) | T4 (g2) |
|-----------------------|---------------------|---------|---------|---------|---------|
| PRÉ-TRATAMENTOS | Secas ao ar | S | S | S | N |
| | Água | N | N | N | N |
| | Lavadas | N | N | N | N |
| | Imersas | N | N | N | S |
| | Úmida | N | N | N | S |
| | Hidróxido de cálcio | N | N | N | S |

QUADRO 12 - PRÉ-TRATAMENTOS APLICADOS ÀS PARTICULAS NA PRIMEIRA SÉRIE DE AMOSTRAS

FONTE: O autor (2011)

LEGENDA: S: Sim; N: Não

4.4.1.5 Elaboração dos compósitos exploratórios para produção dos protótipos

A elaboração da dosagem e da mistura exploratória para produção dos compósitos protótipos de madeira cimento nessa primeira série, quanto aos insumos utilizados e pré-tratamentos aplicados à partícula podem ser visualizados no Quadro 11 e no Quadro 12, respectivamente.

A busca de parâmetros preliminares, para determinar a quantidade de insumos e a possibilidade de pré-tratamento a ser aplicado à partícula, foi entendido como um encaminhamento para iniciar o preparo da mistura com faixas granulométricas conhecidas de partículas vegetais a serem utilizadas como agregados de um possível compósito, com o uso de aglomerante de origem mineral e aditivos convencionais empregados na construção civil.

4.4.2 Segunda Série de amostras com avaliação quantitativa e com pré-tratamento das partículas

A segunda série de amostras contou com as informações adquiridas na primeira série, porém, com a confecção de corpos de prova cilíndricos e três tratamentos T1, T2 e T3. O estudo levou em conta para a preparação desses corpos de prova a necessidade da adaptação da norma brasileira NBR 5738 (ABNT, 2003). Essa norma é utilizada para o procedimento de moldagem e cura de corpos de prova de concreto de cimento Portland utilizado na indústria da construção civil. Foram preparados moldes cilíndricos com tubos de PVC, com diâmetro externo nominal de 40mm e altura de 80mm apresentados na Figura 10. Para melhor trabalhabilidade da mistura do compósito foi adotado o fator de correção de água citado por Latorraca e Iwakiri (2005) acrescentado-se o uso de aditivo conhecido como superplastificante para concreto de cimento Portland. A segunda série de amostras foi composta com 350 g cimento Portland, por decímetro cúbico de compósito madeira cimento.



FIGURA 10 - CORPOS DE PROVA E MOLDES DE PVC CILÍNDRICOS
FONTE: O autor (2011)

4.4.2.1 Tratamento T1 com partículas de galhos g2 e imersão em água

A investigação nesse tratamento utilizou 175,0 g de cimento Portland com fator água cimento 0,5 equivalente a 87,5g de água, mais o fator de correção de água para as partículas secas com 26,25g de água, mais 4,37g de aditivo superplastificante e as partículas de galhos g2 conforme Tabela 03 (p.64). O acréscimo da quantidade de água, no estudo desenvolvido, atendeu os termos da equação sugerida por Simatupang (1979) citada por Latorraca e Iwakiri (2005), para o processo de produção de painéis por meio de ação piezotécnica. Assim o traço experimental foi composto de uma parte de cimento Portland para 4,5 partes de partículas vegetais, medido em volume.

Tendo em vista as conclusões de trabalhos já publicados, Fribort *et al.* (2008), Iwakiri (2005) e Iwakiri e Prata (2008), Jorge *et al.* (2004), Latorraca (2000), Molesmi (1974) e Pimentel (2000) e fundamentando-se dessas informações foi aplicado um pré-tratamento às partículas, antes de serem submetidas à mistura com aglomerante mineral, cimento Portland, essas foram imersas em água durante uma hora. Decorrido esse tempo, as partículas foram lavadas em jato de água corrente proveniente da rede pública. Em seguida, foram deixadas secar ao ar por sete dias, em local ventilado e abrigado da luz e calor solar, no Laboratório de Painéis de Madeira da UFPR, para então serem misturadas à pasta de cimento Portland e moldados nos cilindros de PVC. Os moldes cilíndricos confeccionados em PVC, para este fim, com abertura ao longo da geratriz, fechados por cintas plásticas para facilitar o desmolde foram enchidos em três fases, para evitar falhas ou vazios internos e aplicado-se o processo vibração mecânica. Os compósitos ficaram confinados durante sete dias no interior desses moldes. O acabamento de capeamento das superfícies dos corpos de prova para posterior assentamento sobre a mesa da máquina de ensaio, foi ato contínuo depois do término do processo de vibração dinâmica do corpo de prova.

O tratamento contou com dez corpos de prova sendo moldados cinco ao mesmo tempo mediante a fixação entre os corpos com cintas plásticas, contendo três e dois corpos de prova, respectivamente. Os corpos de prova foram curados ao ar por vinte e oito dias, no Laboratório de Painéis da UFPR, respeitada as condições ditadas a esses compósitos pela NBR 5738 (ABNT, 2003).

4.4.2.2 Tratamento T2 com partículas de galhos g2 e imersão em hidróxido de cálcio

A investigação nesse tratamento utilizou 175,0 g de cimento Portland, 87,5g de água, mais o fator de correção de água para as partículas secas com 26,25g de água, mais 4,37g de aditivo superplastificante e 0,5 dm³ de partículas galhos g2 conforme Tabela 03 (p. 64). Assim o traço experimental para esse tratamento T2 foi composto de uma parte de cimento Portland para quatro vírgula cinco partes de partículas vegetais, medido em volume.

No segundo tratamento T2 desta segunda série foram igualmente usados os mesmos parâmetros para dosagem dos componentes da mistura do tratamento e durante uma hora as partículas foram submetidas por um processo de mistura ao contato da solução de hidróxido de cálcio, na concentração 75g de solução para 0,5dm³ de partículas e, em seguida foram lavados em jato de água potável da rede pública e deixados secar ao ar durante sete dias no Laboratório de Produção de Painéis de Madeira da UFPR. Decorrido esse prazo de sete dias foi efetuada a mistura, moldagem e compactação vibro dinâmica de dez corpos de prova, cinco de cada vez na máquina de vibração. Em seguida foram deixados curar ao ar, por vinte e oito dias no mesmo laboratório e foram igualmente submetidos ao ensaio de compressão axial.

4.4.2.3 Tratamento T3 com partículas de galhos g1 e imersão em hidróxido de cálcio

A investigação nesse tratamento utilizou 175,0 g de cimento Portland, 87,5g de água, mais o fator de correção de água para as partículas secas com 26,25g de água, mais 4,37g de aditivo superplastificante e 0,5 dm³ de partículas de galhos da faixa granulométrica g1 da Tabela 02 (p. 62). Assim o traço experimental foi composto de uma parte de cimento Portland para quatro vírgula cinco partes de partículas vegetais, medido em volume.

O terceiro tratamento T3 desta segunda série de amostras se diferencia do tratamento T2 devido à variação da faixa granulométrica para g1 e o preparo da mistura do compósito contou com a incorporação dos resíduos do pré-tratamento concomitantemente com o preparo das partículas contidas na faixa granulométrica g1 para galhos conforme a Tabela 02 (p. 62).

Portanto, ao final desse pré-tratamento com o processo de imersão em hidróxido de cálcio as partículas não foram lavadas, deixando-se secar ao ar no laboratório durante sete dias.

Os insumos utilizados e os pré-tratamentos aplicados às partículas para a composição do compósito cimento prospectado na Segunda Série Amostras estão apresentados respectivamente nos Quadro 13 e Quadro 14.

| TRATAMENTO PARTICULAS | | T1 (g2) | T2 (g2) | T3 (g1) |
|-----------------------|----------------------|---------|---------|---------|
| INSUMOS | Cimento (g) | 175,0 | 175,0 | 175,0 |
| | Água (g) | 87,5 | 87,5 | 87,5 |
| | Correção de água (g) | 26,25 | 26,25 | 26,25 |
| | Plastificante (g) | 4,37 | 4,37 | 4,37 |
| | Reforçador (g) | N | N | N |
| | Norma para ensaio | ABNT | ABNT | ABNT |

QUADRO 13 - INSUMOS UTILIZADOS NA SEGUNDA SÉRIE DE AMOSTRAS

FONTE: O autor (2011)

LEGENDA: N: Não

NOTA: Os insumos estão apresentados para 0,5 dm³ do compósito madeira cimento

| TRATAMENTOS PARTICULAS | | T1 (g2) | T2 (g2) | T3 (g1) |
|------------------------|---------------------|---------|---------|---------|
| PRÉ-TRATAMENTOS | Secas ao ar | S | S | S |
| | Água | S | N | N |
| | Lavadas | S | S | N |
| | Imersas | S | S | S |
| | Úmida | N | N | N |
| | Hidróxido de cálcio | N | S | S |

QUADRO 14 - PRÉ-TRATAMENTOS APLICADOS NA SEGUNDA SÉRIE DE AMOSTRAS

FONTE: O autor (2011)

LEGENDA: S: Sim; N: Não

4.4.3 Terceira série de amostras com avaliação quantitativa do efeito da ação de aditivos para a construção civil

a) Insumos utilizados

A terceira série do estudo exploratório continha a faixa granulométrica de partículas de galhos g2 para os quatro tratamentos. Para os tratamentos T1, T2 e T3 dessa série permaneceram mantidos os parâmetros de consumo de insumos vegetais, cimento Portland e água, utilizados na série de amostras precedente. A

quantidade de 0,5% de aditivo superplastificante foi acrescentada e, acrescentado o aditivo conhecido como reforçador de aderência, adesivo sintético modificado com polímeros que, quando utilizado na construção civil possui a finalidade de melhorar a característica de aderência das argamassas ao substrato a que se adere. Esse aditivo reforçador de aderência foi dosado em proporção recomendada pelo seu fabricante, uma parte de aditivo reforçador de aderência para duas partes de água, já incrementada com o seu respectivo fator de correção. A quantidade de volume devido ao acréscimo do reforçador fez parte do volume total de água pertencente à relação A/C (fator água cimento).

No tratamento T4 a prospecção manteve a mesma quantidade de cimento e seu respectivo fator A/C, tendo sido declinado o uso de aditivos superplastificante e reforçador. A terceira série de estudo teve diretriz a recomendação da norma da NBR5738 (ABNT, 2003) adaptada, e os insumos utilizados para a composição do compósito cimento prospectado na Terceira Série de Amostras estão apresentados no Quadro 15.

| | | TRATAMENTOS PARTÍCULAS | | | |
|----------------|----------------------|-----------------------------------|------------|------------|------------|
| | | T1 (g2) | T2 (g2) | T3 (g2) | T4 (g2) |
| INSUMOS | Cimento (g) | 175,0 | 175,0 | 175,0 | 175,0 |
| | Água (g) | 58,30 | 58,30 | 58,30 | 87,50 |
| | Correção de água (g) | 17,50 | 17,50 | 17,50 | 26,25 |
| | Plastificante (g) | 5,25 | 5,25 | 5,25 | N |
| | Reforçador (g) | 37,9 | 37,9 | 37,9 | N |
| | Norma para ensaio | ABNT | ABNT | ABNT | ABNT |

QUADRO 15 - INSUMOS UTILIZADOS NA TERCEIRA SÉRIE DE AMOSTRAS

FONTE: O autor (2011)

LEGENDA: N: Não

NOTA: Os insumos estão apresentados para 0,5 dm³ do compósito madeira cimento

b) Pré-tratamento Aplicado às Partículas

Para o pré-tratamento da terceira série aplicado às partículas de galhos g2, visíveis no Quadro 16 a seguir, o tratamento T1 contou com os procedimentos de partículas de galho imersas em água por uma hora, posteriormente lavadas em jato de água corrente e secas ao ar no laboratório. No tratamento T2, o procedimento de imersão foi o hidróxido de cálcio durante uma hora, em seguida lavadas em jato de água corrente e posteriormente secas ao ar no laboratório.

O pré-tratamento para as partículas que constituíram o tratamento T3 teve como destaque a deposição do hidróxido de cálcio no seu conteúdo durante uma

hora de imersão nessa solução e deixadas secar ao ar no laboratório. O tratamento T4 sofreu na fase de pré-tratamento a imersão em hidróxido de cálcio e as partículas de galhos ainda em estado úmido foram misturadas aos respectivos insumos compondo o compósito madeira cimento em estado fresco desse tratamento. Os tratamentos da terceira série T1, T2, T3, e T4 com os seus respectivos pré-tratamento ficaram em condições para serem misturadas à pasta de cimento.

| TRATAMENTOS PARTÍCULAS | | T1 (g2) | T2 (g2) | T3 (g2) | T4 (g2) |
|---------------------------|---------------------|------------|------------|------------|------------|
| PRÉ-TRATAMENTOS | Secas ao ar | S | S | S | N |
| | Água | S | N | N | N |
| | Lavadas | S | S | N | N |
| | Imersas | S | S | S | S |
| | Úmida | N | N | N | S |
| | Hidróxido de cálcio | N | S | S | S |

QUADRO 16 - PRÉ-TRATAMENTOS APLICADOS NA TERCEIRA SÉRIE DE AMOSTRAS

FONTE: O autor (2011)

LEGENDA: S: Sim; N: Não

4.4.4 Quarta série de amostras com avaliação quantitativa do efeito da adição de aditivos sobre a alternância de uso entre partículas de galhos e de troncos

No Quadro 17 pode ser observada a alternância de uso de partículas de troncos t1 e t2 seguida da alternância de uso das partículas de galhos g1 e g2 durante o desenvolvimento do estudo exploratório da quarta série de amostras do compósito cimento madeira, em quatro tratamentos T1, T2, T3 e T4 permanecendo mantidos os parâmetros de consumo de insumos vegetais, cimento Portland, água e aditivos plastificantes utilizados na terceira série de amostras.

| TRATAMENTOS PARTÍCULAS | | T1 (t1) | T2 (g1) | T3 (t2) | T4 (g2) |
|---------------------------|----------------------|------------|------------|------------|------------|
| INSUMOS | Cimento (g) | 175,0 | 175,0 | 175,0 | 175,0 |
| | Água (g) | 58,30 | 58,30 | 58,30 | 58,30 |
| | Correção de água (g) | 17,50 | 17,50 | 17,50 | 17,50 |
| | Plastificante (g) | 5,25 | 5,25 | 5,25 | 5,25 |
| | Reforçador (g) | 37,9 | 37,9 | 37,9 | 37,9 |
| | Norma para ensaio | ABNT | ABNT | ABNT | ABNT |

QUADRO 17 - INSUMOS UTILIZADOS NA QUARTA SÉRIE DE AMOSTRAS

FONTE: O autor (2011)

NOTA: Os insumos estão apresentados para 0,5 dm³ do compósito madeira cimento

O Quadro 18 destaca os procedimentos dos pré-tratamentos que foram secos ao ar durante sete dias, das partículas de troncos t1 e de galhos g1 que ainda não haviam sido prospectadas com esse procedimento. Para as partículas de galhos g2 e para as partículas de troncos t2 as aplicações dos aditivos comerciais combinadas com o pré-tratamento das partículas com hidróxido de cálcio e imediata mistura à pasta de cimento, em seguida ao procedimento do pré-tratamento.

| | | TRATAMENTOS PARTÍCULAS | T1 (t1) | T2 (g1) | T3 (t2) | T4 (g2) |
|------------------------|---------------------|---------------------------|------------|------------|------------|------------|
| PRÉ-TRATAMENTOS | Secas ao ar | | S | S | N | N |
| | Água | | N | N | N | N |
| | Lavadas | | N | N | N | N |
| | Imersas | | S | S | S | S |
| | Úmida | | N | N | S | S |
| | Hidróxido de cálcio | | S | S | S | S |

QUADRO 18 - PRÉ-TRATAMENTOS APLICADOS NA QUARTA SÉRIE DE AMOSTRAS

FONTE: O autor (2011)

LEGENDA: S: Sim; N: Não

4.4.5 Quinta série de amostras adaptada da norma ASTM D 1037 (1999)

A avaliação qualitativa e quantitativa dos corpos de prova moldados com partículas de galhos com a faixa granulométrica g2, em formatos e dimensões segundo as recomendações da norma estrangeira ASTM D 1037 (1999) adaptada, se apresentam no Quadro 19. Os procedimentos com pré-tratamento foram aplicados às partículas de galhos g2 deixando-as secar ao ar, no laboratório de painéis e o uso de aditivos comerciais foi aplicado ao compósito e ainda em estado fresco foram moldados em formas de madeira com formato prismático.

| | | TRATAMENTO PARTÍCULAS | T1 (g2) | | | TRATAMENTO PARTÍCULAS | T1 (g2) |
|----------------|-------------------------|--------------------------|------------|----------------------------|--|--------------------------|------------|
| INSUMOS | Cimento (g) | | 175,0 | PRÉ- TRATAMENTO | | Secas ao ar | S |
| | Água (g) | | 58,30 | | | Água | N |
| | Correção de água (g) | | 17,50 | | | Lavadas | N |
| | Plastificante (g) | | 5,25 | | | Imersas | S |
| | Reforçador (g) | | 37,9 | | | Úmida | N |
| | Norma para ensaio | | ASTM | | | Hidróxido de cálcio | S |

QUADRO 19 - INSUMOS E PRÉ-TRATAMENTOS APLICADOS NA QUINTA SÉRIE DE AMOSTRAS

FONTE: O autor (2011)

LEGENDA: S: Sim; N: Não

NOTA: Os insumos estão apresentados para 0,5 dm³ do compósito madeira cimento

4.5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 04 (p. 79) apresenta as avaliações e os resultados obtidos durante a prospecção do estudo. A ferramenta conceitual apresentada na Figura 06 (p. 61) proporcionou o início do trabalho para o estudo, pois se tratava de uma situação nova. Foi adotado para a avaliação qualitativa, indicadores, denominados de (F) fraco, (M) médio e (B) bom, para a avaliação subjetiva do comportamento do corpo de prova do compósito. Consoante, na observação dos resultados qualitativamente na fase prospectiva foi enfatizada:

- a evolução do processo de preparo dos insumos;
- a mistura dos insumos utilizados;
- a moldagem da mistura nas formas;
- a compactação do compósito;
- a cura do compósito;
- a aparência final do compósito;
- a facilidade de mistura proporcionada pelos compósitos com agregados de origem vegetal.

TABELA 04 - AVALIAÇÃO E RESULTADOS DAS SÉRIES DE AMOSTRAS PRELIMINARES DE TRATAMENTOS DA PROSPECÇÃO DO COMPÓSITO MADEIRA CIMENTO - FATOR ÁGUA CIMENTO = 0,5

| Série de amostras | Tratamento | Troncos | Galhos | Avaliação qualitativa | | | | | Avaliação quantitativa | | | Insumos | | | | | Pré-tratamentos aplicados às partículas | | | | | | |
|-------------------|----------------|---------|--------|-----------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---|------------------------------|--------------------------------------|-------------|----------|----------------------|-------------------|----------------|---|-------------|------|---------|---------|-------|---------------------|
| | | | | Trabalhabilidade | Início de pega (inibição) | Adesão interna partículas | Resistência ao esborramento | Resistência à torção manual | Tensão média à compressão axial (kg/cm ²) | Coefficiente de variação (%) | Densidade média (g/cm ³) | Cimento (g) | Água (g) | Correção de água (g) | Plastificante (g) | Reforçador (g) | Norma para ensaio | Secas ao ar | Água | lavadas | imersas | úmida | hidróxido de cálcio |
| 1ª | T ₁ | t1 | | F | F | F | F | F | NA | NA | 0,526 | 150 | 75 | N | N | N | N | S | N | N | N | N | N |
| | T ₂ | t1 | | F | F | F | M | M | NA | NA | 0,567 | 175 | 87,5 | N | N | N | N | S | N | N | N | N | N |
| | T ₃ | | g2 | F | F | F | M | M | NA | NA | 0,761 | 175 | 87,5 | N | 4,37 | N | N | S | N | N | N | N | N |
| | T ₄ | | g2 | M | M | F | M | M | NA | NA | 0,751 | 175 | 87,5 | N | N | N | N | N | N | N | S | S | S |
| 2ª | T ₁ | | g2 | F | F | F | M | M | 4,22 | 7,82 | 0,618 | 175 | 87,5 | 26,25 | 4,37 | N | ABNT | S | S | S | S | N | N |
| | T ₂ | | g2 | F | F | M | M | M | 7,93 | 21,86 | 0,808 | 175 | 87,5 | 26,25 | 4,37 | N | ABNT | S | N | S | S | N | S |
| | T ₃ | | g1 | M | M | M | M | M | 12,86 | 6,74 | 0,841 | 175 | 87,5 | 26,25 | 4,37 | N | ABNT | S | N | N | S | N | S |
| 3ª | T ₁ | | g2 | M | M | M | M | M | 10,01 | 2,22 | 0,810 | 175 | 58,3 | 17,5 | 5,25 | 37,9 | ABNT | S | S | S | S | N | N |
| | T ₂ | | g2 | M | M | B | B | B | 19,19 | 5,39 | 0,808 | 175 | 58,3 | 17,5 | 5,25 | 37,9 | ABNT | S | N | S | S | N | S |
| | T ₃ | | g2 | M | M | B | B | B | 20,48 | 13,12 | 0,841 | 175 | 58,3 | 17,5 | 5,25 | 37,9 | ABNT | S | N | N | S | N | S |
| | T ₄ | | g2 | B | B | B | B | B | 14,58 | 13,11 | 0,695 | 175 | 87,5 | 26,25 | N | N | ABNT | N | N | N | S | S | S |
| 4ª | T ₁ | t1 | | M | B | B | B | B | 26,57 | 47,38 | 0,784 | 175 | 58,3 | 17,5 | 5,25 | 37,9 | ABNT | S | N | N | S | N | S |
| | T ₂ | | g1 | M | B | B | B | B | 20,43 | 11,32 | 0,736 | 175 | 58,3 | 17,5 | 5,25 | 37,9 | ABNT | S | N | N | S | N | S |
| | T ₃ | t2 | | B | B | B | B | B | 23,74 | 13,26 | 0,800 | 175 | 58,3 | 17,5 | 5,25 | 37,9 | ABNT | N | N | N | S | S | S |
| | T ₄ | | g2 | B | B | B | B | B | 16,91 | 9,64 | 0,764 | 175 | 58,3 | 17,5 | 5,25 | 37,9 | ABNT | N | N | N | S | S | S |
| 5ª | T ₁ | | g2 | M | B | B | M | M | 15,16 | 11,99 | 0,855 | 175 | 58,3 | 17,5 | 5,25 | 37,9 | ASTM | S | N | N | S | N | S |

FONTE: O autor (2011)

LEGENDA: g1, g2, t1, t2: Faixas Granulométricas Utilizadas

S: Sim; N: Não; NA: Não avaliado

F: Fraco; M: Médio; B: Bom

NOTA: Os insumos estão apresentados para 0,5 dm³ do compósito madeira cimento

4.5.1 Resultados da Primeira Série de Amostras

O Quadro 20 apresenta os indicadores obtidos no desenvolvimento da primeira série de amostras preliminares de tratamentos da prospecção do compósito madeira cimento, com partículas de troncos e partículas galhos, suas avaliações e resultados.

| | | FATOR ÁGUA CIMENTO = 0,5 | | | |
|-------------------------------|---|---------------------------------|------------|------------|------------|
| | | T1 (t1) | T2 (t1) | T3 (g2) | T4 (g2) |
| AVALIAÇÃO QUALITATIVA | Trabalhabilidade | F | F | F | M |
| | Início de pega (inibição) | F | F | F | M |
| | Adesão interna partículas | F | F | F | F |
| | Resistência ao esboroamento | F | M | M | M |
| | Resistência à torção manual | F | M | M | M |
| AVALIAÇÃO QUANTITATIVA | Resistência à compressão (kgf/cm ²) | NA | NA | NA | NA |
| | Coefficiente de variação (%) | NA | NA | NA | NA |
| | Densidade aparente média (g/cm ³) | 0,526 | 0,567 | 0,761 | 0,751 |

QUADRO 20 - RESULTADOS DAS AVALIAÇÕES DA PRIMEIRA SÉRIE DE AMOSTRAS DO COMPÓSITO MADEIRA CIMENTO COM PARTÍCULAS DE TRONCOS E GALHOS

FONTE: O autor (2011)

LEGENDA: t1, g2: Faixas Granulométricas Utilizadas

S: Sim; N: Não; NA : Não Avaliado

F: Fraco ; M: Médio; B: Bom

T1,T2,T3 e T4: Tratamentos Prospectados

Quanto a avaliação qualitativa e a avaliação quantitativa dos resultados dos tratamentos da Primeira Série de Amostras, observadas no Quadro 20, considerou-se que:

- O tratamento T1 da primeira série apresentou difícil trabalhabilidade, que causou falhas de envolvimento da pasta de cimento às partículas. Demonstrou o efeito da inibição, pois ao final de três dias, a aderência entre as partículas se mostrava com pouca consistência, comparativamente com os compósitos com agregados minerais que, ao terceiro dia depois da mistura já se faz presente. Aos 28 dias, a resistência a compressão manual perceptível e a resistência ao esforço de torção manual no corpo de prova igualmente foi avaliado como fraco;

- Para produzir o tratamento T2 da primeira série de amostras, houve aumento de 16,66% na quantidade de cimento Portland que, aparentemente demonstrou um aumento percebido pela resistência ao esboroamento, decorridos vinte e oito dias de moldagem e aparente melhor resistência à torção, comparativamente com os corpos de prova do tratamento T1. Embora o controle de vazios não esteja sendo considerado, houve um aumento de densidade do compósito. A partir das observações desses corpos de prova do tratamento T2, optou-se pelo consumo de 350,0 g de cimento Portland para a continuidade e o desenvolvimento de todo o trabalho de pesquisa;
- Com as observações proporcionadas pelos tratamentos T1 e T2, com uso de partículas dentro da faixa granulométrica t1 de troncos, repetiu-se a experiência no tratamento T3 da primeira série, com as partículas da faixa granulométrica de galhos g2. Procurou-se prospectar, se a presença dos fragmentos de cascas e acículas influenciariam o preparo do compósito com esses insumos. As limitações das avaliações qualitativas, embora agregadas à subjetividade do observador, o comportamento do compósito avaliado foi considerado com alguma similaridade ao tratamento anterior T2, observando-se o aumento da densidade do corpo de prova, esperada e justificada com o uso de partículas com menores dimensões específicas;
- No tratamento T4, o hidróxido de cálcio aparentemente demonstrou melhor trabalhabilidade da mistura do compósito, como se esperava, provavelmente diminuindo o efeito da inibição. Ao terceiro dia, já era possível perceber a rugosidade da matriz cimentícia sobre a superfície das partículas de madeira, ao teste do raspar da unha do pesquisador, permanecendo aparentemente, os mesmos e demais atributos nomeados nas avaliações qualitativas.

A primeira série de amostras tinha como ênfase a avaliação qualitativa e foi iniciada para dois tratamentos T1 e T2 com as partículas de troncos pertencentes a faixa granulométrica t1 por apresentarem maior módulo de finura. Justifica-se essa atitude como premissa, devido a associação feita entre concretos com agregados leves. Mehta e Monteiro (2008) afirmam que “a resistência do agregado normalmente não é um fator determinante na resistência do concreto, porque com exceção dos agregados leves, a partícula de agregado é muito mais resistente do que a matriz e a sua zona de transição na interface no concreto.” Esses autores afirmam que os concretos quando são produzidos a partir de componentes com maior módulo de finura, isto é, quanto mais graúdo o agregado, menor a capacidade de resistência de compressão. Dessa forma, se explorou a possibilidade de se encontrar relações, entre os valores da resistência à compressão, para os compósitos preparados com agregados de origem vegetal e a premissa. Para os agregados com origem nas partículas de galhos g2, entendidos nesse trabalho como leves e graúdos, foram desenvolvidos os tratamentos T3 e T4.

Embora a atenção dessa prospecção tenha sido voltada para a avaliação qualitativa, foram avaliados os valores da densidade aparente do compósito prospectado, para os quatro tratamentos da primeira série das amostras. Os resultados dos valores da densidade aparente média para cada um dos tratamentos estão apresentados no Quadro 20 (p. 80) e $0,651\text{g/cm}^3$ foi o valor da densidade média dos quatro tratamentos da primeira série de amostras.

▪ **Discussão dos resultados do tratamento T1 da primeira série**

Na fase da mistura do tratamento T1, se observou a absorção de parte da água de amassamento da pasta de cimento pelas partículas de troncos t1 secas da madeira, e cada paralelepípedo moldado continha uma faixa granulométrica apenas, para se observar o comportamento dos compósitos nas diferentes faixas granulométricas isoladamente apresentadas na Tabela 02 (p. 62). A ação de vibro compactação observada e esperada se apresentou sem evidência e sem a requerida adesão entre as partículas do agregado, demonstrando relativa opacidade em estado fresco, pois o brilho proporcionado pela água da mistura é característico na pasta de cimento Portland durante a manutenção do efeito vibratório. A evolução do processo de cura dos corpos de prova é devida ao enrijecimento do aglomerante

mineral por meio de seus componentes químicos hidratados. Foram acompanhados de maneira visual e tátil, oito blocos testemunhas moldados e reservados para esse fim, conforme a utilização dos insumos e tratamento dado às partículas, como está apresentado no Quadro 11 e Quadro 12 (p. 70). Os blocos de corpos de prova restantes também em número de oito, procedentes do primeiro tratamento, tiveram o prazo de cura respeitado, em vinte e oito dias, recomendado pela NBR 5738 (ABNT, 2003) intocados, durante o seu armazenamento ao ar no Laboratório de Painéis da UFPR, para a necessária avaliação qualitativa pelo pesquisador, do comportamento do compósito como um todo.

A avaliação quantitativa da densidade aparente do compósito prospectado foi realizada para o primeiro tratamento da primeira série das amostras e apresentou como resultados da densidade aparente média $0,526 \text{ g/cm}^3$, sendo o valor da densidade média de todos os quatro tratamentos $0,651 \text{ g/cm}^3$.

▪ **Discussão dos resultados do tratamento T2 da primeira série**

No tratamento T2 da primeira série foi aumentado o consumo do aglomerante mineral na ordem de 16,66% em massa, em relação à mesma quantidade de partículas vegetais t1 descritas no Quadro 11 (p. 70). As informações advindas dos protótipos do tratamento T1 da primeira série, quando inseridas no tratamento T2 da primeira série foram observadas, comparadas e avaliadas qualitativamente pela participação do pesquisador e descritas no Quadro 12 (p. 70).

▪ **Discussão dos resultados do tratamento T3 da primeira série**

Para o preparo e prospecção do tratamento T3 da primeira série utilizando partículas de galhos g2 foi adicionado ao compósito o aditivo comercial conhecido como plastificante para concretos. O aditivo utilizado, em 2,5% da massa do cimento, para manutenção do fator água cimento A/C em 0,5 para os concretos de cimento com agregados minerais, proporcionando trabalhabilidade à mistura, a facilidade de moldagem, fenômeno igualmente proporcionado ao compósito cimento madeira. Sua ação tornou o comportamento da pasta aparentemente mais fluída durante a mistura, comparativamente com aquelas misturas obtidas nos tratamentos T1 e T2. O consumo de cimento continuou mantido em 350 g/dm^3 nessa fase de

mistura da pasta. A adição do plastificante a mistura demonstrava a possibilidade de maior trabalhabilidade quando se exige que a matriz cimentícia proporcione completo revestimento às partículas com baixos teores no fator água cimento.

▪ **Discussão dos resultados do tratamento T4 da primeira série**

A busca pela simplificação do processo de preparo e as possibilidades de tornar o compósito madeira cimento a custos acessíveis, conduziu para uma exploração de um quarto tratamento T4 dessa primeira série, com partículas de galhos g2, no qual, a substituição do superplastificante se fez por hidróxido de cálcio para a elaboração do compósito. O hidróxido de cálcio tem como característica, quando adicionado às argamassas com componentes minerais, a capacidade de beneficiar a trabalhabilidade da mistura, além do poder aglomerante, quando usado em ambiente aéreo. Diante da expectativa que as mesmas propriedades pudessem ser transmitidas aos agregados vegetais, foi prospectado, um novo compósito no tratamento T4.

4.5.2 Resultados da Segunda Série de Amostras com Avaliação Quantitativa

A segunda série do estudo, seguindo as diretrizes do mapa conceitual, Figura 06 (p. 61) havia como objetivo o estudo quantitativo. Foram escolhidos para compor os primeiros corpos de prova desta série, composições e traços de mistura que haviam apresentado melhor comportamento experimental na primeira série quanto ao aspecto de trabalhabilidade, inibição, adesão interna das partículas, resistência ao esboroamento quando curado, resistência à torção manual e ao exame visual e tátil.

O Quadro 21 apresenta os indicadores obtidos no desenvolvimento da segunda série de amostras preliminares de tratamentos da prospecção do compósito madeira cimento com partículas de galhos com suas avaliações e resultados.

| | | FATOR ÁGUA CIMENTO = 0,5 | | |
|-----------------------------------|---|--------------------------|------------|------------|
| | | T1 (g2) | T2 (g2) | T3 (g1) |
| AVALIAÇÃO QUALITATIVA | Trabalhabilidade | F | F | M |
| | Início de pega (inibição) | F | F | M |
| | Adesão interna partículas | F | M | M |
| | Resistência ao esboroamento | M | M | M |
| | Resistência à torção manual | M | M | M |
| AVALIAÇÃO QUANTITATIVA | Resistência à compressão (kgf/cm ²) | 4,22 | 7,93 | 12,86 |
| | Coeficiente de variação (%) | 7,82 | 21,86 | 6,74 |
| | Densidade aparente média (g/cm ³) | 0,618 | 0,808 | 0,841 |

QUADRO 21 - AVALIAÇÕES E RESULTADOS DA SEGUNDA SÉRIE DE AMOSTRAS DO COMPÓSITO MADEIRA CIMENTO COM PARTÍCULAS DE GALHOS

FONTE: O autor (2011)

LEGENDA: g1; g2: Faixas Granulométricas Utilizadas

F: Fraco; M: Médio; B: Bom

▪ Discussão dos resultados do tratamento T1 da segunda série

Tendo em vista, a repetição da primeira série de amostras com a aplicação de variações parciais nos insumos e nos pré-tratamentos aplicados às partículas e, se considerando a necessidade de valores quantificados, sabendo-se que, são aceitos universalmente como índice de referência, os valores da resistência à compressão axial das amostras, quando usado aglomerante cimentício, as informações qualitativas de adesão interna, das partículas de galhos g2, obtidas no

estudo da primeira série de amostras, conduziram à verificação da possibilidade de se aplicar um pré-tratamento para minimizar tal situação.

Para tanto, foram aplicadas soluções descritas na literatura por Iwakiri (2005), Iwakiri e Prata (2008), Latorraca (2000) e Molesmi (1974) para os compósitos cimento madeira e então, se proporcionou a imersão das partículas por uma hora, em água fria seguida por uma lavagem em água corrente e posterior secagem ao ar. Decorrido o tempo de sete dias com o mesmo procedimento de mistura, foi preparado o compósito que foi moldado em cilindros de PVC nomeados de tratamento T1, conforme Quadro 22 obedecendo-se a adaptação da NBR 5738 (ABNT, 2003).

Observou-se que diante do tempo requerido de mistura para completo envolvimento da pasta de cimento em torno da partícula de madeira, com o fator água cimento adotado $A/C = 0,5$ e também, durante o processo de vibração, houve aparente dificuldade de ligação entre as interfaces das partículas revestidas com a pasta de cimento. Entretanto, a aparente dificuldade de adesão persistiu, embora as partículas tenham sido tratadas com água fria ou hidróxido de cálcio conforme mostra o Quadro 22.

| TRATAMENTOS PARTÍCULAS | | T1 (g2) | T2 (g2) | T3 (g1) |
|-----------------------------|---------------------|------------|------------|------------|
| PRÉ- TRATAMENTOS | Secas ao ar | S | S | S |
| | Água | S | N | N |
| | Lavadas | S | S | N |
| | Imersas | S | S | S |
| | Úmida | N | N | N |
| | Hidróxido de cálcio | N | S | S |

QUADRO 22 - PRÉ-TRATAMENTOS APLICADOS NA SEGUNDA SÉRIE DE AMOSTRAS

FONTE: O autor (2011)

LEGENDA: S: Sim; N: Não

A solução encontrada aconteceu a partir das informações presentes na literatura, apresentada pelos pesquisadores Latorraca e Iwakiri (2005), para os compósitos de cimento madeira. Houve ainda, a introdução de aditivo plastificante para uso em concreto, na construção civil, mais um acréscimo da quantidade de água, até se perceber uma ligação entre interfaces da pasta de cimento com as partículas do conteúdo do compósito, durante o processo de compactação vibro dinâmica.

O acréscimo da quantidade de água, no estudo desenvolvido, atendeu os termos da equação sugerida por Simatupang (1979) citada por Latorraca e Iwakiri (2005), para o processo de produção de painéis por meio de ação piezotécnica. Foi o fator $0,35 \cdot C$ da equação, onde a letra C, é a quantidade de cimento em kg, no estudo apresentado foi substituído e adotado como $0,50 \cdot C$, permanecendo todos os demais termos da equação. Com os pré-tratamentos apresentados no Quadro 22 (p. 86) foi possível moldar, romper e obter resultados em corpos de prova cilíndricos do compósito madeira cimento de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2003) adaptada, que especifica procedimentos para moldagem e cura de corpos de prova.

Na máquina de ensaios do Laboratório de Tecnologia da Madeira da UFPR os corpos de prova foram rompidos. O tratamento T1 da segunda série de amostras do estudo de prospecção apresentaram em média a capacidade de suporte à tensão de compressão em até $4,22 \text{ kg/cm}^2$ com um coeficiente de variação de 7,82% para essa média.

▪ **Discussão dos resultados do tratamento T2 da segunda série**

As amostras do tratamento T2 da segunda série apresentaram a capacidade média de suporte à tensão de compressão em até $7,93 \text{ kg/cm}^2$, para um coeficiente de variação da média em 21,86%. É possível que o incremento de resistência do tratamento T1 para o tratamento T2 tenha sido devido a adição de hidróxido de cálcio às partículas de galhos g2 como procedimento de pré-tratamento.

▪ **Discussão dos resultados do tratamento T3 da segunda série**

Da mesma forma, como nas prospecções anteriores foi procedido com o tratamento T3 da segunda série utilizando-se partículas de galhos g1, com dez corpos de prova. Foram preparadas as misturas, moldadas e compactadas com os mesmos parâmetros de consumo de insumos e ao final de vinte e oito dias de cura a capacidade de suporte ao esforço de compressão axial apresentou o valor em média de $12,86 \text{ kg/cm}^2$, sendo o seu coeficiente de variação da média de 6,74%.

4.5.3 Resultados da Terceira Série de Amostras com Avaliação Qualitativa e Quantitativa

O estudo da terceira série de tratamento prospectivo do compósito madeira cimento foi conduzido com as mesmas condições proporcionadas pela fonte de insumos e valendo-se somente de partículas de galhos contidas na faixa granulométrica g2. Alguns dos procedimentos de pré-tratamento das partículas prospectados nos tratamentos da segunda série foram utilizados e ainda, a aplicação do aditivo para melhoria de desempenho das argamassas e concretos de cimento Portland, disponível no mercado de produtos para a construção civil, conhecido como reforçador de aderência para argamassas. As avaliações e resultados estão apresentadas no Quadro 23.

| | | FATOR ÁGUA CIMENTO = 0,5 TRATAMENTOS PARTÍCULAS | | | |
|-----------------------------------|---|--|------------|------------|------------|
| | | T1 (g2) | T2 (g2) | T3 (g2) | T4 (g2) |
| AVALIAÇÃO QUALITATIVA | Trabalhabilidade | M | M | M | B |
| | Início de pega (inibição) | M | M | M | B |
| | Adesão interna partículas | M | B | B | B |
| | Resistência ao esboroamento | M | B | B | B |
| | Resistência à torção manual | M | B | B | B |
| AVALIAÇÃO QUANTITATIVA | Resistência à compressão (kgf/cm ²) | 10,01 | 19,19 | 20,48 | 14,58 |
| | Coefficiente de variação (%) | 2,22 | 5,39 | 13,12 | 13,11 |
| | Densidade aparente média | 0,810 | 0,808 | 0,841 | 0,695 |

QUADRO 23 - AVALIAÇÕES E RESULTADOS DA TERCEIRA SÉRIE DE AMOSTRAS DO COMPOSITO MADEIRA CIMENTO COM PARTÍCULAS DE GALHOS g2

FONTE: O autor (2011)

LEGENDA: g2: Faixa Granulométrica Utilizada

M: Médio; B: Bom

No exame dos valores apresentados pelos resultados da média da RC, em 16,56 kg/cm² dos três primeiros tratamentos T1, T2 e T3, apresentados no Quadro 23, observou-se o incremento dos valores das médias da RC em 98,7%, quando comparada com a média dos resultados dos valores da RC em 8,33 kg/cm² dos três tratamentos da segunda série, conforme Quadro 21 (p. 85). O incremento dessa grandeza pode ser atribuído à aplicação do aditivo reforçador de aderência, pois, o pré-tratamento aplicado às partículas foi idêntico nesses três primeiros tratamentos aplicados na 2ª série e na 3ª série conforme a Tabela 04 (p. 79).

O tratamento T4 da terceira série de amostras com $RC = 14,58\text{kg/cm}^2$, comparativamente com a média dos tratamentos T1, T2 e T3 dessa série apresentou uma redução de 13,5% no resultado das médias dos valores da resistência a compressão; e uma redução de 17,9% na média dos valores da densidade aparente média (ME) dos corpos de provas. Entretanto, a média dos resultados de resistência à compressão dos corpos de prova do tratamento T4 dessa série ($14,58\text{ kg/cm}^2$), quando comparados com os resultados da média dos corpos de prova do tratamento T1, dessa mesma série ($10,01\text{ kg/cm}^2$) denotam um incremento de 45,6% na resistência à compressão. A exceção desse tratamento T4 consiste em ausência do uso do reforçador de aderência e do aditivo plastificante para argamassas e concretos e a aplicação do pré-tratamento com hidróxido de cálcio. Considerando-se ainda a avaliação qualitativa, os indicadores selecionados como a trabalhabilidade, o início de pega do cimento, a adesão interna das partículas e a resistência ao esboroamento mostrou-se com melhor desempenho o tratamento T4, quando comparado com o tratamento T1 dessa terceira série.

Nos tratamentos T1, T2 e T3 a quantidade do volume de líquidos devido ao acréscimo do reforçador e plastificante fez parte do volume total da água da relação A/C, decorrentes da sua correção de umidade e aumento de volume dos líquidos. As correções de $0,35^\circ\text{C}$ para $0,50^\circ\text{C}$ foram estabelecidas com suporte na Equação do Consumo de Água sugerida por Simatupang (1979) citada por Latorraca e Iwakiri (2005).

No tratamento T4 da terceira série desse estudo, os aditivos comerciais não foram utilizados. Atribui-se aos possíveis efeitos dessa ausência, o decréscimo do valor do resultado da resistência a compressão. Entretanto, credita-se ao pré-tratamento com o hidróxido de cálcio melhor envolvimento das partículas de galhos à pasta de cimento, um incremento de resultados quanto a resistência a compressão e redução da massa específica aparente quando comparado com o tratamento T1 da terceira série.

Quanto aos resultados da média da resistência à compressão apresentados pelo tratamento T2 ($19,19\text{ kgf/cm}^2$) e pelo tratamento T3 ($20,48\text{ kgf/cm}^2$), dessa terceira série atribui-se a presença residual do hidróxido de cálcio, em menor concentração, devido a lavagem em água no tratamento T2 e, aos aditivos e pré-tratamentos utilizados, os melhores valores das médias de resistência à compressão quando comparados aos tratamentos T1 e T4.

4.5.4 Resultados da Quarta Série de Amostras com Alternância do Uso de Partículas e Alternância das Faixas Granulométricas de Galhos e Troncos

A quarta série contou com a alternância nos insumos vegetais, continha as faixas granulométricas das partículas de galhos g1 no tratamento T2, e partículas de galhos g2 no tratamento T4. As partículas de troncos t1 para o tratamento T1 e as partículas de tronco t2 para o tratamento T2. Os pré-tratamentos das partículas em imersões com hidróxido de cálcio foram também aplicados em todos os tratamentos. Os aditivos plastificantes e aditivos reforçadores de aderência foram consumidos na mesma proporção em todos os tratamentos T1, T2, T3 e T4. As partículas de galhos e partículas de troncos com faixa granulométrica t1 e g1 depois de pré-tratadas foram secas ao ar, no Laboratório de Painéis da UFPR, por sete dias e as partículas de troncos e galhos com faixa granulométrica t2 e faixa granulométrica g2, tiveram a sua mistura imediata à pasta de cimento Portland, depois de pré-tratadas. Os resultados da quarta série estão apresentados no Quadro 24.

| | | FATOR ÁGUA CIMENTO = 0,5 | | | |
|-------------------------------|---|---------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| | | T1 | T2 | T3 | T4 |
| | | (t1) | (g1) | (t2) | (g2) |
| AVALIAÇÃO QUALITATIVA | Trabalhabilidade | M | M | B | B |
| | Início de pega (inibição) | B | B | B | B |
| | Adesão interna partículas | B | B | B | B |
| | Resistência ao esboroamento | B | B | B | B |
| | Resistência à torção manual | B | B | B | B |
| AVALIAÇÃO QUANTITATIVA | Resistência à compressão (kgf/cm ²) | 26,57 | 20,43 | 23,74 | 16,91 |
| | Coefficiente de variação (%) | 47,38 | 11,32 | 13,26 | 9,64 |
| | Densidade aparente média (g/cm ³) | 0,784 | 0,736 | 0,800 | 0,764 |

QUADRO 24 - AVALIAÇÕES E RESULTADOS DA QUARTA SÉRIE DE AMOSTRAS DO COMPOSITO MADEIRA CIMENTO COM PARTÍCULAS DE TRONCOS E PARTÍCULAS DE GALHOS

FONTE: O autor (2011)

LEGENDA: t1; t2; g1; g2: Faixas Granulométricas Utilizadas

M: Médio; B: Bom

A quarta série contendo os tratamentos T1, T2, T3, e T4 demonstrou a melhor média entre todos os resultados dos respectivos tratamentos, apresentando o valor médio de RC em 21,91kgf/cm² e o valor para a densidade aparente média em 0,771g/cm³ para essa série.

Considerando-se o desempenho dos CP pelos indicadores selecionados, a quarta série teve o seu comportamento considerado como bom, na avaliação qualitativa para a resistência à torção manual, para a resistência ao esboroamento e para a adesão interna das partículas nos tratamentos T1, T2, T3 e T4, e para a trabalhabilidade nos tratamentos T3 e T4. No entanto, os mesmos indicadores selecionados para a trabalhabilidade nos tratamentos T1 e T2 foram considerados como médios.

▪ **Discussão dos resultados dos tratamentos T1 e T2 da quarta série**

Ao se proceder a avaliação comparativa dos resultados apresentados pelos tratamentos T1 e T2, procede-se simultaneamente a comparação da faixa granulométrica com partículas de galhos g1 com a faixa granulométrica com partículas de troncos t1. Deve ser considerado, que a faixa granulométrica de galhos g1 continha as cascas dos galhos e as acículas, enquanto a faixa granulométrica de troncos continha partículas de cerne e alburno. Portanto, a redução na média dos resultados dos valores da ME se apresentaram em 6,5%, enquanto as reduções da média dos valores da RC seguiram a mesma tendência de decréscimo e se apresentaram com uma queda de 30%, na RC em comparação entre os tratamentos T1 e T2, apresentadas no Quadro 24 (p. 90).

▪ **Discussão dos resultados dos tratamentos T3 e T4 da quarta série**

Quanto aos tratamentos T3 e T4, deve ser considerado que as possíveis reduções dos resultados entre esses tratamentos quanto às médias da RC e ME apresentadas, podem ter sido decorrentes da diferença intrínsecas das partículas de galhos e das partículas de troncos contidas no compósito, assim como, possivelmente da imediata ação de mistura das partículas à pasta de cimento Portland, não ocorrendo nesses tratamentos, o tempo necessário para a formação da película de carbonatos de cálcio em torno das partículas. Pode-se verificar no resultado da média da RC do tratamento T3 comparativamente com a média no resultado do tratamento T4, um decréscimo de 40% para a RC e 4,7% de redução para a média dos valores da ME dos respectivos tratamentos.

▪ **Discussão dos resultados dos tratamentos da quarta série**

No exame dos resultados dos tratamentos T1 e T3 os valores das médias de resistência à compressão para o tratamento T1 e para o tratamento T3, foi também observado, o comportamento entre faixas granulométricas. A faixa granulométrica t1 e a faixa granulométrica t2 para as partículas de troncos apresentaram redução dos valores da média de RC observado no Quadro 24 (p. 90), de 11,9%. Para a faixa granulométrica t2 isso pode ser atribuída à maior necessidade da disponibilidade de aglomerante em compósitos com menor MF, que conduz a possível dificuldade de organização interna das partículas durante o processo de vibro compactação mecânica, pois a disponibilidade de aglomerante opera como lubrificante entre partículas nessa fase de produção do compósito madeira cimento.

As mesmas considerações de observação foram aplicadas aos resultados apresentados pelos tratamentos T2 e T4, onde foi possível examinar o comportamento de duas faixas granulométricas de galhos. O tratamento T2 com a faixa granulométrica g1 com maior MF apresentou o valor da média de RC superior em 20,8% em relação ao tratamento T4 com faixa granulométrica g2 com menor MF. Possivelmente essa comparação pode ser entendida pelos mesmos argumentos em relação ao MF apresentados para os tratamentos T1 e T3. O maior MF da faixa granulométrica g1 pode ter conduzido ao seu conseqüente melhor desempenho no resultado da RC por disponibilizar maior quantidade de aglomerante para esse tratamento do compósito madeira cimento em estudo.

4.5.5 Resultados da Quinta Série de Amostras com Avaliação do Formato dos Moldes

A quinta série de amostras com um tratamento T1 de partículas de galhos g2, fundamentou-se nas diretrizes recomendadas pela Norma Estrangeira ASTM D 1037 (1999) para painéis de madeira com partículas, adaptadas para a avaliação das características mecânicas do compósito madeira cimento. A escolha da faixa granulométrica de galhos g2 teve como objetivo a prospecção do comportamento dessa faixa quanto à sua conformação no molde prismático, e quantificar o desempenho da RC associado ao comportamento quanto a disponibilidade de aglomerante em relação ao MF, apresentado por essa faixa granulométrica e nessas condições de conformação. A necessidade de conhecimento do comportamento do compósito madeira cimento estudado, em moldes com dimensões e formatos de pequenos painéis a fim de buscar e proporcionar informações para a possível moldagem de painéis de madeira reconstituídos com aglomerantes minerais, fundamentou a quinta série com um tratamento T1 de partículas de galhos g2, conforme apresentado no Quadro 25.

| FATOR ÁGUA CIMENTO = 0,5 TRATAMENTO PARTÍCULAS | | T1 (g2) |
|---|---|--------------------|
| AVALIAÇÃO QUALITATIVA | Trabalhabilidade | M |
| | Início de pega (inibição) | B |
| | Adesão interna partículas | B |
| | Resistência ao esboroamento | M |
| | Resistência à torção manual | M |
| AVALIAÇÃO QUANTITATIVA | Resistência à compressão (kgf/cm ²) | 15,16 |
| | Coeficiente de variação (%) | 11,99 |
| | Densidade aparente média (g/cm ³) | 0,855 |

QUADRO 25 - AVALIAÇÕES E RESULTADOS DA QUINTA SÉRIE DE AMOSTRAS DO COMPOSITO MADEIRA CIMENTO COM PARTÍCULAS DE GALHOS

FONTE: O autor (2011)

LEGENDA: g2: Faixa Granulométrica Utilizada

M: Médio; B: Bom

O resultado da média da resistência à compressão dos corpos de prova em formato de prisma do tratamento T1 da quinta série de amostras, se apresentou com valor de 15,16 kgf/cm² próximo da média da RC dos dois tratamentos T4 (15,71kg/cm²) da terceira e da quarta série apresentadas na Tabela 04 (p. 79).

No Quadro 25 (p. 93) podem ser visualizados os resultados das avaliações qualitativas da quinta série de amostras preliminares para o tratamento T1, da prospecção do compósito madeira com partículas de galhos g2. Quanto as avaliações decorrentes dos indicadores selecionados para a trabalhabilidade, para a resistência ao esboroamento e resistência à torção manual foram consideradas em nível médio, e as avaliações para início de pega e adesão interna das partículas consideradas em nível bom. Entretanto, as avaliações quanto à resistência ao esboroamento e a resistência à torção manual, nessa quinta série de amostras, foram consideradas em nível médio, igualmente ao tratamento T3 da segunda série de amostras; todavia, já haviam sido consideradas em nível bom para os tratamentos T4 da terceira e quarta séries de amostras, todas constituídas de partículas de galhos.

4.6 CONCLUSÃO

Diante das avaliações qualitativas e das avaliações quantitativas realizadas, as observações e as considerações a partir dos resultados da massa específica e da resistência à compressão, foi desenvolvido um novo procedimento de produção de compósitos de madeira cimento, com cimento Portland, por meio de compactação vibro dinâmica, e elaborar um compósito madeira cimento com:

- Ausência de prensagem, ausência de grampeamento pós-prensagem e ausência de passivos ambientais decorrentes da ação do pré-tratamento com hidróxido de cálcio;
- Partículas de galhos e partículas de troncos, com MF entendidas como graúdas, com cimento Portland comum e com compactação vibro dinâmica;
- Moldagem de corpos de prova, auxiliados pela presença de aditivos superplastificantes e reforçadores de aderência, com formatos geométricos diferentes que evidenciaram a possibilidade de elaboração de sólidos e painéis. .

Prospectar experimentalmente por meio de avaliações qualitativas e quantitativas o uso de pré-tratamentos aplicado às partículas de *Pinus* spp, do cimento Portland, do método de compactação vibro dinâmica a ação de aditivos plastificantes e reforçadores de aderência empregados na construção civil para o desenvolvimento de compósito de madeira cimento.

5 INFLUÊNCIA DO PRÉ-TRATAMENTO COM HIDRÓXIDO DE CÁLCIO NAS PARTÍCULAS DE GALHOS DE *Pinus* spp EM COMPÓSITOS DE MADEIRA CIMENTO

5.1 RESUMO

O fenômeno da inibição apresentada no processo de elaboração do compósito de madeira cimento conduziu a necessidade de uso de aditivos, ao uso de cimento de alta resistência inicial. O presente trabalho teve como objetivo observar, analisar e avaliar a ação de três pré-tratamentos aplicados às partículas de madeira. Os materiais empregados foram as partículas de galhos de *Pinus* spp, o hidróxido de cálcio como agente de pré-tratamento das partículas e o cimento Portland como aglomerante. A metodologia utilizada aplicou pré-tratamento com imersão em água e com imersão em solução de hidróxido de cálcio, proveniente da reação do óxido de cálcio com a água. Utilizou compactação vibro dinâmica para conformação do compósito em formatos de corpos de prova. Os valores das médias da resistência à compressão, dos tratamentos foram comparados entre si, na curva de tensão deformação. Os tratamentos apresentaram diferenças acentuadas nos resultados das médias de resistência à compressão realizada aos vinte e oito dias de idade. O pré-tratamento das partículas com hidróxido de cálcio nas partículas de galhos proporcionou uma cobertura mineral na superfície lateral da partícula de madeira decorrente do efeito da carbonatação que reduziu o fenômeno de inibição.

5.2 INTRODUÇÃO

O pré-tratamento em partículas de madeira para o seu emprego em painéis de madeira reconstituída é prática corrente na tecnologia para sua produção. Para os compósitos de madeira cimento tem sido estudados e aplicados pré-tratamentos em insumos de origem vegetal com aditivos, destacadamente cloreto de cálcio, cloreto de magnésio e hidróxido de sódio, a fim de abreviar o tempo decorrido entre a produção e a utilização dos compósitos de madeira cimento.

Buscando contribuir para o estudo do compósito madeira cimento, Simatupang e Geimer (2011) descreveram as possibilidades de se misturar aglomerantes inorgânicos e os processos de produção desses compósitos, destacando as fases de produção respectivamente de cada aglomerante estudado, juntamente com seu aditivo correspondente.

Para Wolfe e Gjinolli (1996), os parâmetros físicos apresentados pelos compósitos de madeira cimento com pré-tratamento dos insumos vegetais, deveriam fornecer requisitos de garantia e segurança para o seu emprego, onde fossem utilizadas e, as propriedades de resistência, densidade, flexibilidade e ductilidade previamente conhecidas e certificadas, além dos atributos citados por Moslemi (1974), para o incremento do emprego dos compósitos de madeira cimento na indústria da construção civil.

A preocupação com a geração de resíduos na indústria da construção pode ser reduzida de acordo com John e Agopyan (2012) e USP (2008), com a introdução no próprio processo da construção esses resíduos transformados, desde que tratados com o rigor que o tema merece e apresentem vantagem competitiva sobre os produtos tradicionais. No Brasil, a possibilidade de produção de elementos gerados com compósitos de madeira cimento pode contribuir com essa redução mediante a introdução desse tipo de material na indústria da construção civil desde que, atendidas às recomendações das normas brasileiras de construção.

A pesquisa embasou-se em alguns resultados de publicações divulgados por Fribort *et al.* (2008), Iwakiri (2005) e Iwakiri e Prata (2008), Jorge *et al.* (2004), Latorraca e Iwakiri (2005), Lima (2009), Matoski (2005), Molesmi (1974), Molesmi (1998) e Silva (2006) e estudou a possibilidade do desenvolvimento de um novo procedimento de obtenção de compósitos de madeira cimento.

A relação de consumo do cimento nesse estudo foi estabelecida a fim de se possibilitar a redução de custo e da densidade aparente do compósito, comparativamente com outros compósitos de cimento madeira já estudados. Esses compósitos leves pesquisados utilizando o cimento Portland CP II - Z apresentaram-se com a densidade média aparente de $0,744\text{g/cm}^3$ e coeficiente estatístico de variação da média em 12,11% para uma relação média do traço cimento/partículas em 1: 0,9 em massa nos tratamentos exploratórios estudados.

5.2.1 Objetivo

Estudar e analisar o comportamento do compósito madeira cimento produzido com partículas de galhos submetidas à aplicação de pré-tratamento com hidróxido de cálcio às partículas de galhos de *Pinus* spp.

5.3 MATERIAIS E MÉTODOS

O pré-tratamento das partículas de galhos consistiu em imersão em água e em seguida de lavagem em jato de água corrente, imersão em solução de hidróxido de cálcio seguida de lavagem em jato de água corrente e imersão em hidróxido de cálcio sem posterior lavagem.

5.3.1 Partículas Vegetais de Madeira

As partículas vegetais de madeira foram procedentes da Madeireira Rio Verde situada no município de Tunas do Paraná. Esta indústria produz e comercializa este produto como biomassa, utilizando a espécie *Pinus* spp proveniente de florestas plantadas na região. A madeireira processa três tipos de cavacos resultantes de ações mecânicas de descascadores e picadores, reduzindo-os a cavacos de troncos descascados, cavacos de galhos com casca e cavacos das cascas.

O controle da faixa granulométrica na indústria é feito por meio da abertura do ângulo de ataque das facas dos picadores rotativos, à madeira. A garantia de continuidade de fornecimento de material é o corte de árvores, do primeiro desbaste, com até quinze centímetros de DAP e com até oito anos de idade. Para o presente trabalho foram utilizados cavacos de galhos com casca.

Os cavacos de galhos com casca depois de caracterizados apresentaram a granulometria de acordo com a norma NBR 7211 (ABNT, 2005) definida pelo módulo de finura (MF) 5,96. Depois de estabilizados em estufa a 3% de umidade, os cavacos de galhos foram submetidos ao moinho de martelos do Laboratório de Produção de Painéis da Universidade Federal do Paraná.

Pela primeira passagem no moinho de martelos, os cavacos de galhos com casca apresentaram na saída pela malha de vinte e cinco milímetros o MF 5,61 e, na segunda passagem pelo mesmo moinho, na saída pela malha de dezenove milímetros gerando o MF 5,14 conforme apresentado na Tabela 02 (p. 62).

Atendendo a recomendação da norma NBR 7211 (ABNT, 2005), o estudo da comparação das curvas granulométricas apresentadas pelos cavacos reduzidos em partículas de galhos, com dimensões entre 2,4mm e 10,3mm podem ser entendidos como pertencentes a faixa granulométrica de agregados graúdos, se comparados com a areia de origem mineral de acordo com a norma NBR 7211 (ABNT, 2005) e em função de sua dimensão máxima característica.

O plano experimental do estudo constituído pela espécie de *Pinus* spp com três processos de tratamento das partículas de galhos denominados T1, T2 e T3 e os respectivos pré-tratamentos aplicados às partículas de galhos apresentam-se no Quadro 26.

| TRATAMENTO | ESPÉCIE | PRÉ-TRATAMENTO APLICADO À PARTÍCULA |
|------------|------------------|---|
| T1 | <i>Pinus</i> spp | Imersa uma hora em água fria e seca ao ar. |
| T2 | <i>Pinus</i> spp | Imersa uma hora em Ca(OH) ₂ , lavada e seca ao ar. |
| T3 | <i>Pinus</i> spp | Imersa uma hora em Ca(OH) ₂ , e seca ao ar. |

QUADRO 26 - PLANO EXPERIMENTAL DO ESTUDO COM *Pinus* spp

FONTE: O autor (2011)

LEGENDA: AF: Água Fria; SAA: Secas ao Ar

5.3.2 Aglomerantes

Neste estudo, para se garantir a adesão entre as partículas ou agregados de origem vegetal, se utilizou aglomerantes aéreos, que detém mecanismos de adesão e endurecimento com reação química em presença do ar e aglomerantes hidráulicos que atuam mediante reação química de adesão e endurecimento em presença de um meio aquoso. A técnica para aglutinação das partículas vegetais desenvolvida por esse trabalho para a produção de compósitos de madeira cimento se utilizou dos dois aglomerantes minerais conhecidos pela indústria da construção civil, a cal aérea neste caso conhecida pelo mercado consumidor como cal virgem e o cimento Portland.

A cal virgem ou óxido de cálcio para ser usada foi hidratada, resultando dessa reação o hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 conhecida como pasta de cal que foi obtida por meio do preparo de uma solução contendo óxido de cálcio, com grau de pureza de 80% e água potável. Terminada a reação exotérmica obteve-se a solução de hidróxido de cálcio, na relação 4,7:1 isto é, quatro vírgula sete partes de água para uma parte de óxido de cálcio, em massa, que ficou em processo de complementação da reação de hidratação e resfriamento por vinte e quatro horas em temperatura ambiente.

O cimento Portland comum disponível em sacos de 50 kg no mercado fornecedor de insumos para as construções civis foi misturado com água potável, formou uma pasta semilíquida, respeitando-se a relação conhecida como fator água cimento, igual a 0,5 isto é, para cada meia parte de água potável, em massa, é disponibilizada na mistura destes ingredientes para uma parte de cimento Portland também em massa.

No desenvolvimento do presente estudo sempre foi utilizado o cimento Portland CP II - Z, do fabricante A e entenda-se como tal, onde estiver escrito cimento Portland ou apenas cimento.

5.3.3 Aditivos Plastificantes

Os componentes ativos dos aditivos redutores de água conhecidos como plastificantes derivam de lignosulfonatos de origem vegetal e apresentam propriedade surfactantes. Para Mehta e Monteiro (2008) podem participar na mistura em até 1% do peso do cimento Portland necessário para o compósito. Trata-se de produto industrializado disponível no mercado de produtos para construção civil, com o nome genérico de aditivo superplastificante, e foi utilizado com dosagem de 2,5% do peso do cimento conforme recomendação do fabricante do aditivo, para manutenção do fator água cimento dentro do parâmetro de 0,5. A facilidade de moldagem com o uso do aditivo superplastificante é proporcionada pela ação do completo envolvimento da superfície lateral da partícula à pasta de cimento.

5.3.4 Pré-tratamento aplicado às Partículas

Os processos de produção de painéis reconstituídos de madeira tem se servido de pré-tratamentos de partículas, a fim de controlar o desenvolvimento de possíveis reações adversas que prejudicam a obtenção dos parâmetros físicos e mecânicos esperados para o produto final, devido aos elementos químicos presentes na madeira. Nos compósitos de madeira cimento, os açúcares derivados retardam o processo de início da cristalização da matriz cimentícia. Na busca pela simplificação do processo para obtenção de compósito de madeira cimento, se procurou minimizar os custos dos insumos e de produção e estudar a possibilidade de processar o pré-tratamento das partículas compatível às técnicas dominadas nos canteiros de obras da indústria da construção civil.

O pré-tratamento foi aplicado às partículas de galhos com presença de casca dos galhos e acículas. O primeiro pré-tratamento se deu pela imersão em água das partículas de madeira durante uma hora, em seguida lavadas em água corrente e deixadas secar ao ar por sete dias. Para o segundo pré-tratamento as partículas foram imersas em solução de hidróxido de cálcio durante uma hora e, decorrido esse tempo, foram lavadas em água corrente e deixadas secar ao ar por sete dias. O terceiro pré-tratamento foi seguindo o mesmo procedimento do anterior, porém as partículas não foram lavadas em água corrente e foram deixadas secar ao ar durante uma semana. Para esse tratamento T3 por imersão, foi utilizado sete

partes de partículas de galhos em volume para uma parte de solução de hidróxido de cálcio, em volume, previamente resfriado.

O processo de carbonatação a frio sobre as partículas de galhos é possível devido a reversibilidade da reação conhecida como ciclo da cal. O minério é encontrado na natureza como carbonato de cálcio (CaCO_3), na indústria produtora de cal, por ação de fornecimento de calor, desenvolve-se a reação de descarbonização do carbonato de cálcio, tornando-se óxido de cálcio (CaO) ou cal virgem. Durante o processo de transformação para hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 conhecida como pasta de cal, ou cal hidratada, ocorre a reação exotérmica pela adição da cal virgem sobre a água, conhecida como queima da cal. A solução alcalina de hidróxido de cálcio com pH 12 obtida, foi adicionada às partículas de madeira durante a mistura, resultante no pré-tratamento descrito por esse trabalho. A reversibilidade do processo se completa quando o dióxido de carbono CO_2 presente na atmosfera, se combina novamente com o hidróxido de cálcio, durante a fase de carbonatação ou secagem, se transformando quimicamente em (CaCO_3) que mineraliza a superfície externa da partícula de madeira, apresentada na Figura 11.

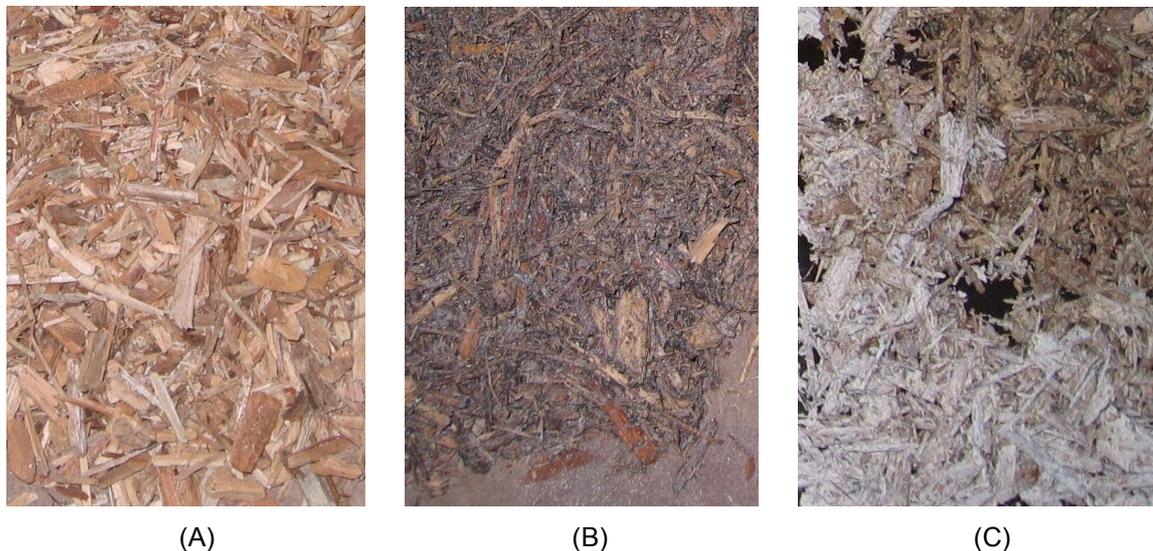


FIGURA 11 - CARBONATAÇÃO AO AR DAS PARTÍCULAS DE GALHOS DE *Pinus* spp
FONTE: O autor (2011)
NOTA: (A) PARTÍCULAS EM ESTADO NATURAL
(B) PARTÍCULAS RECÉM MISTURADAS AO Ca(OH)_2
(C) PARTÍCULAS COM 24 HORAS DEPOIS DE MISTURADAS AO Ca(OH)_2 .

5.3.5 Compósito Madeira Cimento com Pré-tratamento das partículas

O compósito, entendido como o material formado por constituintes diferentes, bem como estruturas diversas, separados por uma interface de pasta de cimento Portland comum, ocorreu pela mistura íntima e bem proporcionada entre partículas vegetais e os aglomerantes minerais que apresentaram nova estrutura e nova propriedade, diversa daquela dos seus materiais constituintes.

Os resultados dos tratamentos apresentados no Quadro 27, para visualização qualitativa e quantitativa e, para o entendimento e comparação dos resultados da avaliação a partir dos ensaios de resistência à compressão no Laboratório de Tecnologia da Madeira da UFPR.

| | | FATOR ÁGUA CIMENTO = 0,5 TRATAMENTOS PARTÍCULAS | T1 (g2) | T2 (g2) | T3 (g1) |
|-----------------------------------|---|--|------------|------------|------------|
| AVALIAÇÃO QUALITATIVA | Trabalhabilidade | | F | F | M |
| | Início de pega (inibição) | | F | F | M |
| | Adesão interna partículas | | F | M | M |
| | Resistência ao esboroamento | | M | M | M |
| | Resistência à torção manual | | M | M | M |
| AVALIAÇÃO QUANTITATIVA | Resistência à compressão (kgf/cm ²) | | 4,22 | 7,93 | 12,86 |
| | Coefficiente de variação (%) | | 7,82 | 21,86 | 6,74 |
| | Densidade aparente média (g/cm ³) | | 0,618 | 0,808 | 0,841 |

QUADRO 27 - AVALIAÇÕES E RESULTADOS DAS AMOSTRAS DO COMPÓSITO MADEIRA CIMENTO COM PARTÍCULAS DE GALHOS

FONTE: O autor (2011)

LEGENDA: g1, g2: Faixas Granulométricas Utilizadas
F: Fraco; M: Médio; B: Bom

Os resultados desses ensaios de resistência à compressão foram obtidos pelos corpos de prova do compósito produzidos, moldados e curados no padrão da norma brasileira NBR 5738 (ABNT, 2003) adaptada. A credibilidade dos resultados obtidos dos ensaios axiais de compressão é entendida por Neville (1997), e aceitos por Mehta e Monteiro (2008) como parâmetros universalmente aceitos como índice de referência da resistência do material ensaiado, quando é usado o aglomerante cimentício.

Para o preparo do compósito foram misturados cimento Portland CP II - Z e água na proporção que é expresso como fator água cimento A/C 0,5 adicionando-se a água sobre o pó, com fator de correção de água citado por (LATORRACA;

IWAKIRI, 2005). O plastificante foi adicionado na razão de 2,5% sobre a massa de cimento Portland juntamente e misturado com a água. Houve uma pausa para a completa hidratação do cimento Portland de aproximadamente 15 minutos. A ação de mistura entre as partículas de madeira e a pasta de cimento se deu até a completa homogeneização entre as fases da mistura, isto é, quando foi observado que todas as superfícies laterais das partículas se apresentavam revestidas pela pasta de cimento e água e, assim para todos os tratamentos. A dosagem das partículas foi volumétrica dentro do delineamento previamente determinado, considerando o consumo máximo de 350g de cimento Portland por decímetro cúbico de compósito. O corpo de prova cilíndrico a ser preenchido pelo compósito continha 1:0,9 isto é, uma parte de cimento para nove décimos de parte de partículas de galhos, em massa. Durante a fase de mistura dos materiais constituintes foi respeitada a ordem de colocação das partículas de galhos sobre a pasta de cimento e com esse procedimento se diminui o tempo de mistura dos ingredientes.

5.3.6 Condicionamento dos corpos de prova das amostras

O compósito madeira cimento preparado foi colocado e moldado em corpos de prova cilíndricos, com 4,0cm de diâmetro e 8,0cm de altura, confeccionados de PVC, preparados para esse fim, com abertura ao longo da geratriz, fechados por cintas plásticas para facilitar o desmolde, conforme mostra a Figura 12(A). Esses moldes foram enchidos em três fases, para evitar falhas ou vazios internos durante o processo de vibração dinâmica, mostrados na Figura 12(B).



(A)



(B)

FIGURA 12 - MOLDES CILÍNDRICOS EM PVC FECHADOS POR CINTAS PLÁSTICAS
FONTE: O autor (2011)

Os compósitos ficaram confinados durante sete dias no interior dos moldes. O acabamento de capeamento das superfícies dos corpos de prova para posterior assentamento sobre a mesa da máquina de ensaio foi ato contínuo depois do término do processo de vibração dinâmica dos corpos de prova das amostras.

Os três tratamentos contaram com dez corpos de prova cada um, sendo moldados cinco ao mesmo tempo, mediante a fixação entre os moldes dos corpos de prova por meio de cintas plásticas, contendo três e dois corpos de prova respectivamente. Os corpos de prova foram curados ao ar no Laboratório de Painéis de Madeira da UFPR, respeitadas as condições ditadas a essa mistura pela NBR 5738 (ABNT, 2003).

5.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados da avaliação das características físicas e mecânicas do compósito dos três tratamentos T1, T2 e T3, da quantidade de insumos utilizados e dos pré-tratamentos aplicados às partículas de galhos de *Pinus spp* visualizados na Tabela 05.

TABELA 05 - AVALIAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DO COMPÓSITO, QUANTIDADE DE INSUMOS E PRÉ-TRATAMENTO APLICADOS ÀS PARTÍCULAS DE GALHOS *Pinus spp*

| Galhos | | Avaliação física e mecânica do compósito | | | Insumos | | | | Norma para ensaio utilizada | Pré-tratamento aplicado à partícula | | | | |
|------------|----------------------|---|------------------------------|--------------------------------|-------------|----------|----------------------|-------------------|-----------------------------|-------------------------------------|------|---------|---------|---------------------|
| Tratamento | Faixa granulométrica | Tensão média à compressão axial (kg/cm ²) | Coefficiente de variação (%) | Densidade (g/cm ³) | Cimento (g) | Água (g) | Correção de água (g) | Plastificante (g) | | Secas ao ar | Água | lavadas | imersas | hidróxido de cálcio |
| T1 | g2 | 4,22 | 7,82 | 0,618 | 175 | 87,5 | 26,25 | 4,37 | ABNT | S | S | S | S | N |
| T2 | g2 | 7,93 | 21,86 | 0,808 | 175 | 87,5 | 26,25 | 4,37 | ABNT | S | N | S | S | S |
| T3 | g1 | 12,86 | 6,74 | 0,841 | 175 | 87,5 | 26,25 | 4,37 | ABNT | S | N | N | S | S |

FONTE: O autor (2011)

LEGENDA: g: Faixas granulométricas utilizadas para partículas de galhos

S: Sim; N: Não

NOTA: ABNT norma adaptada para moldagem e ensaios mecânicos

Podemos observar na Tabela 05, que o incremento da resistência a compressão axial cresceu aproximadamente três vezes, de $4,22 \text{ kg/cm}^2$ para $12,86 \text{ kg/cm}^2$ em média, com o coeficiente de variação estatístico da média expresso em 6,74%. O maior resultado apresentado pela resistência à compressão com coeficiente de variação estatístico da média de 6,74% possibilitou ao pesquisador, o entendimento de que, o pré-tratamento aplicado à partícula, possa ter ainda contribuído com melhor homogeneização, observado também na fase da ação manual da mistura e possivelmente proporcionando melhor aderência nas interfaces da matriz cimentícia com as partículas da madeira melhorando os resultados apresentados.

Quanto aos resultados da densidade aparente dos corpos de prova das amostras apresentados na Tabela 05 (p. 105), houve acréscimo de 30% em massa, para o compósito com pré-tratamento comparativamente com o compósito sem pré-tratamento com hidróxido de cálcio. Entretanto, o acréscimo da densidade aparente do compósito nos dois tratamentos T2 e T3 com o hidróxido de cálcio apresentaram um incremento de apenas 4% em massa proporcionalmente a um incremento de 62% dos valores médios da resistência à compressão.

Quanto aos tratamentos T1 e T2, pelo fato de terem sido procedidas imersões em água e em hidróxido de cálcio respectivamente, e subseqüentes lavagens das partículas, podemos entender que no tratamento T1 as partículas se apresentaram para a mistura aproximadamente no estado natural. Para o tratamento T2 a carbonatação pretendida pela imersão das partículas em solução de Ca(OH)_2 e posterior exposição ao ar não ocorreu com a suficiente eficiência esperada, para permitir melhor resultado ao ensaio de resistência à compressão. O incremento desse resultado foi de aproximadamente duas vezes, não condizente com as dificuldades geradas nas etapas de pré-tratamento de partículas e a sua respectiva geração de passivos ambientais, isto é, os efluentes líquidos resultantes do processo empregado.

O pré-tratamento T3 apresentou o fenômeno de carbonatação possivelmente com maior intensidade, isto é, a superfície lateral das partículas se apresentou mostrando a cor branca com maior intensidade, possivelmente devido a maior quantidade de Ca(OH)_2 e maior absorção do dióxido de carbono presente na atmosfera. Devido ao pré-tratamento não contar com a subseqüente lavagem das partículas, os resíduos da reação de carbonatação se incorporaram à partícula da

madeira se tornando parte da película branca que revestia a partícula de carbonato de cálcio. Portanto, há possibilidade que esse pré-tratamento não adicione ao processo de produção de compósitos de madeira cimento, maior passivo ambiental quer sólido ou líquido enquanto pré-tratamento das partículas.

A observação das curvas de tensão deformação no gráfico da Figura 13, durante a fase elástica de aplicação da carga axial conforme Lacerda (1964) conduziu à interpretação do módulo de resistência do material elástico, neste caso do compósito, que pode ser entendido como o coeficiente angular da reta nessa fase do ensaio. O tratamento T3 se apresentou com maior coeficiente angular que os tratamentos T1 e T2, demonstrando maior módulo de resistência entre os tratamentos, considerando-se a mesma forma de avaliação.

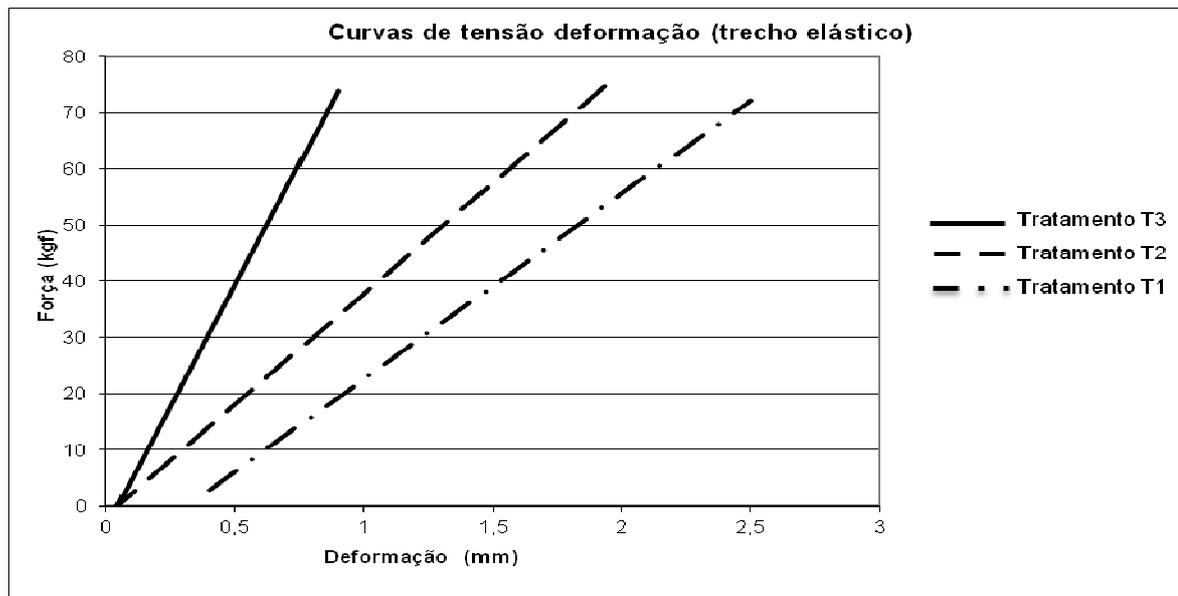


FIGURA 13 - CURVAS DE TENSÃO DEFORMAÇÃO PARA OS TRATAMENTOS T1, T2 e T3
 FONTE: O autor (2011)

Os valores dessas médias foram comparados entre si na curva de tensão deformação. Diante dos resultados apresentados pelo estudo com o uso do cimento Portland CP II - Z, como aglomerante, demonstrou-se a possibilidade do emprego desse compósito para produção de elementos de madeira cimento, moldados, com a forma geométrica desejada e comportamento estável para o manuseio, armazenamento e transporte das peças produzidas.

Os valores dos resultados encontrados nessa pesquisa não foram comparados com outros valores já estudados, devido as seguintes diferenças:

- quanto ao uso de cimento Portland CP II Z;
- quanto ao processo de moldagem dos corpos de prova com utilização de aparelho de compactação vibro dinâmica e;
- quanto ao processo de cura ao ar sem uso de pré grampeamento durante o tempo de condicionamento.

5.5 CONCLUSÃO

Diante dos resultados e informações obtidos durante o trabalho exploratório com pré-tratamento com hidróxido de cálcio nas partículas de galhos g2 e g1 de *Pinus spp* foi possível concluir que:

- Os resultados apresentados pelos ensaios de compressão axial dos corpos de prova dos compósitos nos quais foram utilizados pré-tratamentos nas partículas de galhos com hidróxido de cálcio apresentaram incremento quanto à resistência.
- O tratamento T3 que recebeu e permaneceu com hidróxido de cálcio, por não ter sido lavado na fase de pré-tratamento apresentou o maior coeficiente angular da reta no trecho elástico do diagrama tensão deformação, representando maior módulo de elasticidade à compressão do compósito;
- O fenômeno de inibição aconteceu com menor intensidade devido ao efeito de carbonatação no tratamento T3, proporcionado pela cobertura mineral na superfície lateral da partícula de madeira decorrente da sua exposição de secagem ao ar;
- O compósito do tratamento T3 não deixou resíduos como passivos ambientais, pois estes foram incorporados ao conteúdo do compósito, assim como, todos os insumos utilizados para sua elaboração, demonstrando em resumo o melhor resultado;

Para futuras utilizações dos compósitos madeira cimento desse estudo em ambientes construídos, a norma brasileira de construção civil permite o uso de elementos sólidos para fechamentos de ambientes internos, quer tijolos, blocos ou placas, de cerâmica ou compósitos, desde que respeitados em seus parâmetros valores mínimos de conformidade com a nova NBR 15575 (ABNT, 2008).

6 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO COMPÓSITO MADEIRA CIMENTO MOLDADO POR COMPACTAÇÃO VIBRO DINÂMICA

6.1 RESUMO

O presente trabalho avaliou o comportamento das características físicas e mecânicas do compósito madeira cimento de baixa densidade com a utilização de cimento Portland disponíveis no mercado. Os materiais vegetais empregados para esse estudo foram duas faixas granulométricas de partículas, cada uma, preparada a partir de cavacos de galhos e de cavacos de troncos, pré-tratados em hidróxido de cálcio. Foi utilizado o cimento Portland CP II - Z, mais aditivo superplastificante e aditivo reforçador de aderência. Os corpos de prova foram moldados por compactação vibro dinâmica, em moldes cilíndricos e prismáticos sem necessidade de ação piezométrica e foram rompidos depois de vinte e oito dias de cura ao ar no Laboratório de Tecnologia da Madeira da UFPR. As duas marcas de cimento Portland CP II - Z proporcionaram a aglutinação das partículas de galhos e troncos pré-tratadas com hidróxido de cálcio, compactadas vibro dinamicamente, conferindo ao compósito madeira cimento, de baixa densidade, propriedades físicas e mecânicas e confiabilidade para o atendimento às normas de desempenho onde se destinar o uso desse compósito.

6.2 INTRODUÇÃO

A pesquisa prospectiva com elementos de madeira cimento com o aproveitamento de resíduos florestais fundamentou-se em conhecimentos adquiridos pelas ciências florestais, da madeira e da ciência dos materiais de construção. As partículas de galhos e as partículas de troncos de madeira foram processadas por picadores de facas, na madeireira. No laboratório de Painéis da UFPR foram secas em estufa, até apresentarem três por cento de umidade aparente e assim, possibilitar sua redução em duas faixas granulométricas no moinho de martelos.

O cimento Portland foi utilizado como aglomerante mineral, as partículas da madeira como agregados mineralizados e a conformação dos corpos de prova do compósito madeira cimento foi por meio de moldagem com auxílio de vibração dinâmica, que proporcionou a acomodação e a compactação das partículas vegetais envolvidas na pasta de cimento Portland. Os moldes foram preenchidos com o compósito de madeira cimento confeccionados a partir das instruções ditadas pelas Normas Brasileiras para avaliação de corpos de prova de concreto de cimento Portland que foram adaptadas para essa pesquisa.

As dimensões para confecção dos corpos de prova para as Normas Européia e Americana preconizadas para painéis de madeira reconstituída foram adaptadas e adequadas para proporcionar a moldagem do compósito madeira cimento nas suas dimensões finais para os ensaios, dispensando os recortes tradicionais aplicados aos painéis de madeira.

Pela disponibilidade de dois fabricantes de cimento na região de Curitiba foram pesquisados tratamentos com faixas granulométricas equivalentes para essas duas possibilidades. Para amenizar o efeito de inibição foi empregado o pré-tratamento com óxido de cálcio, para as duas marcas de cimento Portland disponíveis de dois fabricantes diferentes. Foram ainda utilizados superplastificante redutor de água com reforçador de aderência nas dosagens recomendadas pelos respectivos fabricantes desses aditivos. Os ingredientes químicos para o pré-tratamento foram introduzidos e permaneceram no conteúdo do compósito não deixando resíduos ambientais.

Devido a alcalinidade dos aglomerantes e do compósito em estado fresco, os riscos para a saúde e segurança do trabalho do pesquisador foram controlados dentro dos limites conhecidos e na mesma proporção para o preparo de argamassa com agregados minerais conhecidos pela construção civil.

A facilidade de moldagem e compactação, a simplicidade do processo de cura, os resultados obtidos dos tratamentos nos ensaios de resistência à compressão, de resistência à flexão, de tração perpendicular à superfície do corpo de prova, de inchamento em espessura e as avaliações da massa específica média aparente conduzem viabilidade de aplicação em processos construtivos, o compósito de madeira cimento, a partir de partículas e resíduos de florestas plantadas com a espécie *Pinus* spp.

6.2.1 Objetivo

Avaliar as propriedades físicas e mecânicas dos compósitos de madeira cimento produzido com partículas de galhos e partículas de troncos moldados por meio de compactação vibro dinâmica.

6.2.2 Objetivos Específicos

- a) Observar os resultados do compósito madeira cimento empregando-se cimento Portland com uso de duas marcas de fabricantes diferentes existentes no mercado de materiais para construção civil em Curitiba.
- b) Executar e avaliar os ensaios dos corpos de prova moldados em formato cilíndrico e prismático decorrente da preconização das normas de ensaios vigentes, nacional e estrangeira.
- c) Analisar as características físicas do compósito como a massa específica aparente, a absorção de água, as variações dimensionais da espessura e a variação dimensional superficial.

- d) Analisar a função do hidróxido de cálcio como agente de pré-tratamento das partículas de troncos e partículas de galhos e possível redutor do fenômeno da inibição.

- e) Avaliar os resultados dos ensaios de resistência a tração perpendicular às superfícies - ligação interna - das partículas dos corpos de prova à luz da possibilidade do emprego de futuras peças confeccionadas como elementos pré-fabricados para a construção civil.

- f) Avaliar os resultados dos ensaios de flexão estática simples.

- g) Avaliar a possibilidade da cura do compósito de madeira cimento ao ar sem necessidade de ações piezotécnicas.

- h) Observar a possibilidade da introdução de peças produzidas a partir de recursos renováveis da natureza com garantia de atendimento às normas de desempenho para a indústria da construção civil.

6.3 MATERIAIS E MÉTODOS

Devido a realização da prospecção experimental já desenvolvida com o cimento da marca C1, o estudo avaliou os resultados da experimentação com duas marcas de cimento Portland C1 e cimento C2 e as partículas de galhos e partículas de troncos de *Pinus* spp.

6.3.1 Partículas

As partículas de galhos e as partículas de troncos obtidas dos respectivos cavacos secos em estufa foram moídas e caracterizadas para o estudo, como se apresenta na Tabela 06.

TABELA 06 - MÓDULO DE FINURA DAS PARTÍCULAS DE TRONCOS E PARTÍCULAS DE GALHOS, APÓS DUAS REDUÇÕES NO MOINHO DE MARTELOS

| Granulometria para troncos t1 | Granulometria para galhos g1 | Granulometria para troncos t2 | Granulometria para galhos g2 |
|--------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| 5,67 | 5,61 | 5,33 | 5,14 |

FONTE: O autor (2012)

As dimensões das malhas das peneiras, o módulo de finura (MF) e as granulometrias das partículas de galhos e das partículas de troncos após uma redução de dimensão para t1 e g1 e duas reduções de dimensão para t2 e g2 no moinho de martelos, atenderam os requisitos da norma NBR 7211 (ABNT, 2005) adaptada para partículas de madeira dessa pesquisa.

6.3.2 Aglomerantes

O cimento Portland disponível no mercado fornecedor de materiais para as construções quando misturado com água potável, formou uma pasta líquida, respeitando-se a relação conhecida como fator água cimento igual a 0,5 isto é, para cada meia parte de água potável, em peso, é disponibilizada na mistura destes ingredientes uma parte de cimento Portland em peso. A opção pelo uso do cimento convencional de baixo custo em substituição ao cimento de cura rápida de alto custo

foi determinada pela busca de um processo que pudesse simplificar a obtenção de compósito de madeira cimento. Complementarmente, o compósito para o estudo desse trabalho foi elaborado com uso de duas marcas de cimento disponíveis no mercado, na região de Curitiba. No desenvolvimento do presente estudo sempre foi utilizado o cimento Portland CP II - Z, e entenda-se como tal, onde estiver escrito cimento.

A cal virgem ou óxido de cálcio foi hidratado, resultando dessa reação o hidróxido de cálcio, conhecida como pasta de cal. Esse aglomerante aéreo em forma de pasta líquida foi obtido por meio do preparo de uma solução contendo 1.600g de óxido de cálcio, com grau de pureza de 80%, mais 6,0 dm³ de água, resultando a relação de 4,7:1 isto é, quatro vírgula sete partes de água para uma parte de óxido de cálcio, em peso, que ficou em processo de complementação da reação e resfriamento por vinte e quatro horas em temperatura ambiente.

6.3.3 Moldes para os corpos de prova

Para atendimento à norma nacional e à norma estrangeira adaptadas, a serem utilizadas, foram construídos moldes cilíndricos e moldes prismáticos que respectivamente atenderam as recomendações das mesmas. Os moldes prismáticos construídos em madeira com a utilização de chapas de compensado, para fôrmas de concreto, proporcionaram por meio de aberturas das laterais um desmolde facilitado, sem aplicação de esforços com espátulas ou ferramentas que ocasionassem qualquer tipo de dano aos corpos de prova.

As dimensões e características desses moldes dos corpos de prova produzidos para os ensaios foram:

- Os moldes cilíndricos em PVC apresentavam um volume interno líquido de 88,32 cm³ com as dimensões em 4,0 cm de diâmetro externo e com 8,0 cm, de geratriz, para ensaio de resistência à compressão, conforme a Figura 14(A) a seguir;
- Os moldes prismáticos de madeira compensada apresentavam um volume interno líquido de 62,5 cm³ com dimensões de 2,5 cm x 2,5cm x 10 cm, para ensaio de resistência à compressão, conforme Figura 14(B) a seguir;

- Os moldes prismáticos de madeira compensada apresentavam um volume interno líquido de $62,5 \text{ cm}^3$ com dimensões de $2,5 \text{ cm} \times 5,0 \text{ cm} \times 5,0 \text{ cm}$, para o ensaio de ligação interna;
- Os moldes prismáticos de madeira compensada apresentavam um volume interno líquido de $687,5 \text{ cm}^3$ com dimensões de $2,5 \text{ cm} \times 5,0 \text{ cm} \times 55,0 \text{ cm}$, como vigas para o ensaio de flexão estática;
- Os moldes prismáticos de madeira compensada apresentavam um volume interno líquido de $250,0 \text{ cm}^3$ com dimensões de $2,5 \text{ cm} \times 10,0 \text{ cm} \times 10,0 \text{ cm}$, como pequenos painéis, para o ensaio de absorção e inchamento, conforme Figura 14(B).

Na figura 14(A) estão apresentados os corpos de prova cilíndricos e seus respectivos moldes de PVC. Na Figura 14(B) estão apresentados os corpos de prova prismáticos e respectivos moldes de madeira compensada, visualizando em primeiro plano os prismas para ensaio de compressão e em segundo plano, da Figura 14(B), os corpos de prova para o ensaio de tração perpendicular à superfície do compósito.



(A)



(B)

FIGURA 14 - MOLDES DOS CORPOS DE PROVA

(A) CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS EM PVC

(B) CORPOS DE PROVA PRISMÁTICOS EM MOLDES MADEIRA COMPENSADA

FONTE: O autor (2012)

6.3.4 Aditivos

Dois tipos de aditivos foram utilizados misturados na água, o aditivo derivado de lignosulfonados, conhecido como superplastificante para argamassas minerais e o aditivo conhecido como adesivo sintético modificado com polímeros aqui denominado de reforçador de aderência, derivado de copolímero estireno acrílico, dentro dos limites de dosagens recomendadas pelo seu fabricante.

6.3.5 Equipamentos

A mesa vibratória desenvolvida exclusivamente para pesquisa utilizou o moto vibrador elétrico que aplicava a carga de impacto vertical equivalente a 22 daN à 3.000 RPM. Algumas ferramentas de uso em obras de construção civil como pás e colheres para mistura de argamassas, bem como recipientes plásticos para misturar os insumos foram utilizados.

Os instrumentos de precisão, o pHmetro, os micrometros, as balanças, os dosadores e os equipamentos de moagem, a série de peneiras e as máquinas utilizadas para os ensaios pertencem a UFPR e estão nos Laboratório de Painéis e Laboratório de Tecnologia da Madeira.

6.4 PRODUÇÃO DO COMPÓSITO MADEIRA CIMENTO

6.4.1 Plano experimental

A necessidade de conhecimento e obtenção de resultados físicos e mecânicos iniciais sobre os compósitos de cimento Portland conduziu a elaboração de adaptações das normas técnicas nacionais para concreto de cimento Portland e normas estrangeiras para produção de painéis de madeira reconstituídos, para as suas aplicações nos corpos de prova a serem produzidos. As duas marcas de cimento disponíveis no mercado fornecedor de insumos para a construção aparecem no Quadro 28 como o cimento C1 procedente do fabricante A e o cimento C2 procedente do fabricante B.

| CIMENTO | FORMATO DO CP | FAIXAS GRANULOMÉTRICAS DAS PARTÍCULAS | | | |
|---------|---------------|---------------------------------------|----|----|----|
| | | g1 | g2 | t1 | t2 |
| C1 | Cilíndrico | g1 | g2 | t1 | t2 |
| | Prismático | g1 | g2 | t1 | t2 |
| C2 | Cilíndrico | g1 | g2 | t1 | t2 |
| | Prismático | g1 | g2 | t1 | t2 |

QUADRO 28 - PLANO EXPERIMENTAL PARA A MOLDAGEM E A PRODUÇÃO DO COMPÓSITO MADEIRA CIMENTO

FONTE: O autor (2012)

LEGENDA: g: Partículas de Galhos; t: Partículas de Troncos

6.4.2 Ensaios físicos e ensaios mecânicos

Para a execução dos ensaios físicos e ensaios mecânicos foram utilizadas as normas e quantidade de corpos de prova que se encontram no Quadro 29 a seguir. Para os ensaios mecânicos de resistência à compressão axial foi adaptada a norma brasileira e a norma estrangeira.

| ENSAIO | NORMA ADAPTADA | CORPOS DE PROVA |
|--|-----------------------|------------------------|
| Massa Específica | EN 323 (EN, 1993) | 32 |
| Absorção de água e Inchamento em relação à espessura | D 1037 (ASTM, 1999) | 16 |
| Expansão Linear | D 1037 (ASTM, 1999) | 16 |
| Resistência à compressão | NBR 5738 (ABNT, 2003) | 16 |
| | D 1037 (ASTM, 1999) | 32 |
| Flexão estática | EN 310 (EN, 2002) | 32 |
| Módulo de elasticidade | | |
| Módulo de resistência | | |
| Resistência à tração perpendicular à superfície | EN 319 (EN, 2002) | 32 |

QUADRO 29 - ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICOS, NORMAS UTILIZADAS E QUANTIDADE DE CORPOS DE PROVA PARA A PRODUÇÃO DE COMPÓSITO MADEIRA CIMENTO
 FONTE: O autor (2012)

6.4.3 Preparo das partículas

Quando procedentes da madeireira, os cavacos de galhos e troncos apresentavam-se em embalagens diferentes. A caracterização da sua granulometria ocorreu mediante a passagem pela série de peneiras e suas aberturas das malhas apresentadas no Quadro 08 (p. 52) e Quadro 09 (p. 52). Submetidas a secagem até apresentarem 3% de umidade, para poderem ser moídas com duas passagens no moinho de martelos. Na primeira passagem estava fixada na saída do moinho, a peneira de furos circulares com diâmetro nominal de 25 mm e, na segunda passagem a peneira com furos de 19 mm. Portanto, as partículas com menor faixa granulométrica passaram pelo moinho de martelos por duas vezes. Se apresentando então moídas, foram as partículas submetidas à série de peneiras classificatórias e caracterizadas de acordo com a norma NBR 7211 (ABNT, 2005) adaptada e, apresentadas na Tabela 06 (p. 114).

6.4.4 Pré-tratamento aplicado às partículas

Foi aplicado o pré-tratamento com óxido de cálcio, em forma de pasta de cal Ca(OH)_2 às partículas de galhos e partículas de troncos. As partículas foram deixadas secar ao ar em local ventilado e abrigado da luz solar, por sete dias, no Laboratório de Painéis da UFPR.

Na Figura 15 aparece o aspecto desenvolvido pelo pré-tratamento com óxido de cálcio nas partículas. Ao centro das duas figuras apresentam-se as partículas de tronco em estado natural, à esquerda com o pré-tratamento recém aplicado e à direita depois de vinte e quatro horas da aplicação com o aparecimento do aspecto do início da mineralização das partículas de madeira, isto é a tonalidade branca adquirida pelas partículas.



FIGURA 15 - PRÉ-TRATAMENTO DAS PARTÍCULAS DE TRONCO COM ÓXIDO DE CÁLCIO
FONTE: O autor (2012)

Mediante a adaptação da Norma Tappi 252 foi possível a determinação do pH das partículas de galhos e partículas de troncos e a respectiva comparação entre o pH antes e depois de aplicado o aglomerante aéreo em forma de pasta de cal. Nesse ensaio depois de vinte e quatro horas foi possível observar a tonalidade da água destilada das amostras que continham o pré-tratamento contra aquelas que estavam em estado natural conforme a Figura 16 a seguir.

A imagem da Figura 16 (A) mostra o aspecto desenvolvido pelo pré-tratamento com óxido de cálcio nas partículas. Na parte superior, à esquerda da imagem estão as partículas de troncos em estado natural (C) e à direita estão as partículas de tronco com o pré-tratamento (D). Na mesma Figura, na parte inferior, à esquerda estão as partículas de galhos, com pré-tratamento (E) e à direita estão as partículas em estado natural (F). Na Figura 16 (B) observam-se as imagens das amostras de galhos e troncos depois de vinte e quatro horas de imersão em água destilada.

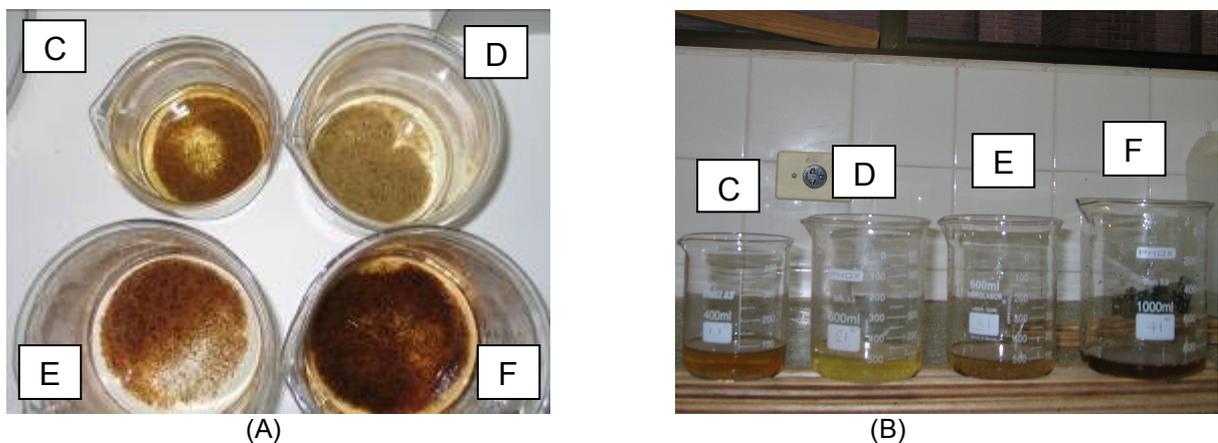


FIGURA 16 - IMAGEM DAS AMOSTRAS DE PARTÍCULAS DE GALHOS E TRONCOS DEPOIS DE VINTE E QUATRO HORAS EM IMERSÃO EM ÁGUA DESTILADA
 FONTE: O autor (2012)

6.4.5 Preparo do compósito madeira cimento

O preparo do compósito foi precedido pela pesagem do cimento Portland que foi fixado em 350g/dm^3 , trezentos e cinquenta gramas de cimento por decímetro cúbico de compósito, esse consumo de cimento é recomendado pela NBR 12655 (ABNT, 2006) como sendo o mínimo para concretos estruturais enquanto não existem dados estatísticos confiáveis. A dosagem dos aditivos plastificante e reforçador de aderência aparecem respectivamente na Figura 17 (A) a seguir, em 0,3% do peso do cimento e o reforçador em 33,33% da água utilizada para a mistura da pasta de cimento e água e o subsequente início do preparo dessa pasta Figura 17 (B) a seguir.



FIGURA 17 - PROCEDIMENTOS DE DOSAGENS E PREPARO DA PASTA DE CIMENTO
 (A) PROCEDIMENTOS DE DOSAGENS DOS INSUMOS E ADITIVO
 (B) INÍCIO DO PREPARO DA PASTA COM A COLOCAÇÃO DA ÁGUA MAIS ADITIVO REFORÇADOR SOBRE O CIMENTO PORTLAND

Fonte: O autor (2012)

O volume de água consumido na mistura do compósito mais a sua respectiva correção devida a absorção de água pelas partículas da madeira foram determinadas a partir da equação (1) do consumo de água sugerida por Simatupang citada por Latorraca e Iwakiri (2005):

$$\text{Consumo de Água} = 0,35 \cdot C + (0,30 - TU) \cdot M \quad (1)$$

Sendo:

- C = massa de cimento (g);
- TU = teor de umidade da partícula;
- M = massa das partículas (g);
- 0,35 = relação A/C (relação água:cimento).

O termo da equação $0,35 \cdot C$ foi adaptado para $0,50 \cdot C$ para esse estudo e correspondeu a relação água : cimento = 0,50 mais o fator de correção devido ao grau de umidade apresentado pela partícula de madeira que demandava maior quantidade de água para dar melhor trabalhabilidade à ação de mistura.

A relação cimento madeira correspondeu em massa a 1:0,9 isto é, uma parte de cimento para 0,9 (nove décimos) de parte de partículas de madeira. A relação em volume, entretanto se estabeleceu em 1:4,5 isto é, uma parte de cimento para quatro e meia partes de partículas de madeira, em média, entre partículas de galhos ou partículas de troncos.

Com essa quantidade de compósito em estado fresco conforme procedimento de mistura apresentado nas imagens da Figura 18 foram moldados os corpos de prova cilíndricos e prismáticos para os tratamentos e suas repetições.

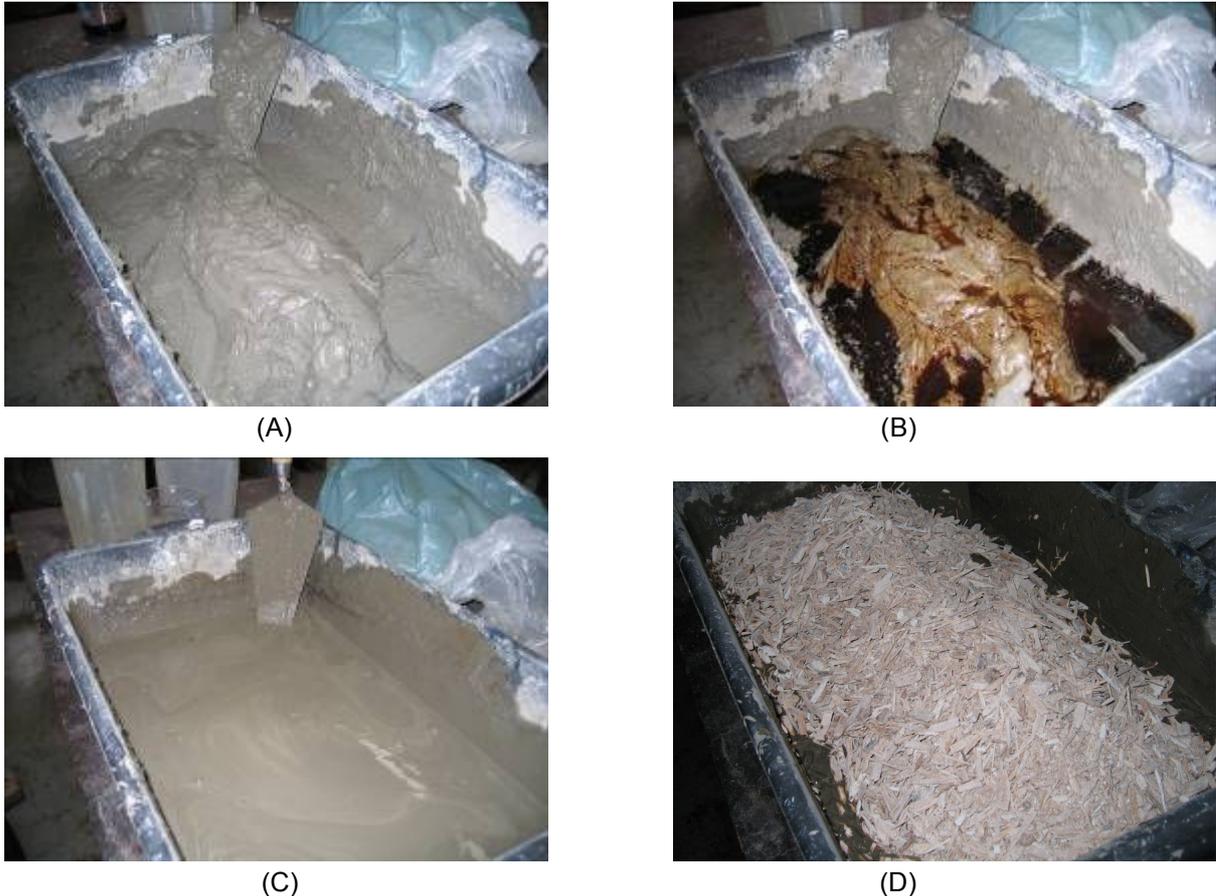


FIGURA 18 - PROCEDIMENTOS DA MISTURA PARA O PREPARO DO COMPÓSITO
 (A) PASTA CIMENTO MAIS ÁGUA E REFORÇADOR DE ADERÊNCIA
 (B) ADIÇÃO DO ADITIVO PLASTIFICANTE SOBRE A PASTA COM REFORÇADOR
 (C) ASPECTO DA FLUIDEZ DA PASTA PELA AÇÃO DO ADITIVO PLASTIFICANTE
 (D) ASPECTO DAS PARTÍCULAS SOBRE A PASTA DE CIMENTO CONTENDO
 ADITIVO REFORÇADOR E ADITIVO PLASTIFICANTE

FONTE: O autor (2012)

Todos os tratamentos e suas repetições seguiram os mesmos parâmetros acima descritos e apresentados no Quadro 28 (p. 118) do Plano Experimental para a moldagem e produção do compósito madeira cimento. Os aditivos foram dissolvidos na água e a mistura da pasta com os aditivos, Figura 18 (C) precedeu a deposição das partículas sobre o fluído na Figura 18 (D).

Estando concluída a mistura de pasta de cimento e partículas, foi deixada em repouso por quinze minutos, apresentada na Figura 19 (A). Decorrido esse tempo foi introduzida nos moldes aplicando-se a vibro compactação dinâmica pela mesa vibratória, durante 30 segundos, conforme Figura 19 (B). Depois desse tempo de compactação o conteúdo no interior do molde, já compactado, foi completado com o compósito até a borda do molde, para novamente ser repetido o processo de vibro compactação. Esse processo aconteceu por três vezes até o acabamento manual de alisamento da superfície visível do corpo de prova produzido para tornar-se completo.



(A)



(B)

FIGURA 19 - PARTÍCULAS ENVOLVIDAS NA PASTA DE CIMENTO E MISTURA COMPACTADA
(A) ASPECTO DAS PARTÍCULAS ENVOLVIDAS PELA PASTA DE CIMENTO E ADITIVOS
(B) FINAL DO ENCHIMENTO E ACABAMENTO SUPERFICIAL DO CORPO DE PROVA

FONTE: O autor (2012)

6.4.6 Cura dos corpos de prova

Os corpos de prova foram curados ao ar inicialmente, dentro dos moldes onde foram fundidos, por sete dias em lugar seco e ventilado abrigado da luz solar no Laboratório de Painéis da UFPR. Decorrido esse prazo os moldes foram abertos sem aplicação de esforços sobre as superfícies dos compósitos e aguardaram 28 dias, nas mesmas condições anteriores de armazenamento, no mesmo laboratório para serem submetidos aos respectivos ensaios físicos e mecânicos preconizados pelas respectivas normas nacionais e normas estrangeiras adotadas e adaptadas.

6.4.7 Ensaio físico e mecânico do compósito

Decorrido o prazo de vinte e oito dias de cura, os corpos de prova foram ensaiados obedecendo às diretrizes das normas da ABNT, EN e ASTM que foram as utilizadas e adaptadas para o presente trabalho, utilizando-se os instrumentos e máquinas de ensaios do Laboratório de Painéis e do Laboratório de Tecnologia da Madeira da UFPR.

6.4.8 Análise estatística

Os dados obtidos dos tratamentos para a análise estatística do trabalho foram interpretados segundo a Análise da Variância (ANOVA). O teste de comparação dos resultados das médias dos tratamentos foi o teste de Tukey, ao nível de 95% de probabilidade, utilizando-se o software Statgraphics plus 4.1.

6.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.5.1 Características Físicas e Química

Estão apresentadas a seguir neste item as características físicas do compósito obtidas mediante os ensaios realizados e preconizados pela norma nacional e norma estrangeira para determinação da massa específica, com o cimento C1 e o cimento C2. A absorção de água e o inchamento em relação à espessura foram obtidos com o cimento C1 e o cimento C2 e a norma estrangeira. A característica química referenciada ao pH das partículas componentes do compósito foram obtidas antes e depois de sofrerem o pré-tratamento com óxido de cálcio.

6.5.1.1 Massa específica dos compósitos

Os resultados dos valores das médias obtidos para a determinação da massa específica aparente dos corpos de prova dos tratamentos preparados para os ensaios realizados e preconizados pela respectiva norma nacional e norma estrangeira, durante o desenvolvimento do trabalho estão apresentados em tabelas específicas.

Depois de serem analisadas estatisticamente e tendo em vista a marca do cimento C1 e marca do cimento C2 utilizados na preparação e obtenção do compósito, os resultados e considerações estão descritos nos itens (a), (b) e (c) a seguir.

a) Na Tabela 07, apresentam-se os resultados dos valores das médias dos ensaios para a massa específica aparente dos corpos de prova do compósito madeira cimento preparados para todos os tratamentos utilizando-se a marca de cimento C1 e a marca de cimento C2, juntamente com seus coeficientes de variação, observando-se a norma NBR 5738 (ABNT, 2003) adaptada para esse ensaio.

TABELA 07 - VALORES DAS MÉDIAS DA MASSA ESPECÍFICA DOS CORPOS DE PROVA - ABNT

| Tratamento | Compósito com cimento C1 | | Compósito com cimento C2 | |
|------------|----------------------------|--------|----------------------------|--------|
| | Média (g/cm ³) | CV (%) | Média (g/cm ³) | CV (%) |
| g1 | 0,59 A | 1,18 | 0,53 A | 1,32 |
| g2 | 0,62 B | 1,13 | NA | NA |
| t1 | 0,60 AB | 1,16 | 0,68 B | 1,03 |
| t2 | 0,61 AB | 1,14 | 0,60 A | 4,71 |
| Média | 0,61 | | 0,60 | |
| p | 0,0491* | | 0,0075** | |

FONTE: O autor (2011)

NOTA: Médias seguidas pelas mesmas letras nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

NA: Não Avaliado;

* Significativo ao nível de 95% de probabilidade;

** Significativo ao nível de 99% de probabilidade

- Compósito com cimento C1 - ABNT

De acordo com a Tabela 07 os resultados da avaliação da massa específica aparente obtidos com o cimento C1 apresentaram diferenças estatísticas entre si. Entre os tratamentos com galhos, a menor massa específica média foi (0,59 g/cm³) para o tratamento com a faixa granulométrica contendo partículas g1, apresentando ainda um maior módulo de finura e maior coeficiente da variação, devido a menor homogeneidade da amostra. Isto se deve ao fato que, possivelmente durante a ação do adensamento por vibro compactação mecânica aconteceram menores reduções de vazios entre as partículas com esse tratamento.

A menor massa específica média entre os tratamentos com troncos (0,60g/cm³) apresentou a mesma tendência dos tratamentos com galhos, isto é, está associada a faixa granulométrica com maior módulo de finura.

- Compósito com cimento C2 - ABNT

De acordo com a Tabela 07 (p. 127) observou-se que os resultados dos valores das médias da massa específica aparente dos compósitos dos tratamentos obtidos com o uso do cimento C2 são estatisticamente diferentes entre si. Entretanto, o menor valor da massa específica ($0,53 \text{ g/cm}^3$) foi para o tratamento com a faixa granulométrica com as partículas g1, não sendo possível a avaliação com a faixa granulométrica g2 por avaria nos corpos de prova.

Entre os tratamentos com troncos verifica-se que a menor massa específica ($0,60 \text{ g/cm}^3$) está associada ao tratamento com partículas t2 de menor módulo de finura e foi observado que o coeficiente de variação estatística da média para esse tratamento se apresentou com o maior valor, possivelmente devido a menor homogeneidade da amostra.

Considerando-se todos os tratamentos elaborados com o cimento C1 e com o cimento C2 com os corpos de prova moldados conforme recomendações da norma NBR 5738 (ABNT, 2003) adaptada, foram reveladas pela análise estatística, diferenças significativas entre os valores das médias dos tratamentos.

A menor massa específica ($0,53 \text{ g/cm}^3$) que representa a situação mais favorável para as construções está associada ao conteúdo do corpo de prova com faixa granulométrica com galhos g1 e cimento C2.

Possivelmente a presença das cascas no conteúdo dos compósitos com partículas de galhos g1 influenciou o resultado do valor dessa massa específica direta e indiretamente. Diretamente, pois as cascas apresentam menor densidade que o material lenhoso; indiretamente, pois durante o processo de adensamento por vibro compactação mecânico, o compósito com essa faixa granulométrica oscilava com maior amplitude dentro do molde de PVC permitindo possivelmente por esse motivo, maior número de vazios entre as partículas.

b) Na Tabela 08 a seguir, apresentam-se os resultados dos valores das médias dos ensaios para a massa específica aparente dos corpos de prova do compósito madeira cimento preparados para todos os tratamentos utilizando-se a marca de cimento C1 e a marca de cimento C2, juntamente com seus coeficientes de variação, observando-se a norma ASTM D 1037 (1999) adaptada para esse ensaio.

TABELA 08 - MÉDIAS DA MASSA ESPECÍFICA DOS CORPOS DE PROVA - ASTM D 1037 (1999)

| Tratamento | Compósito com cimento C1 | | Compósito com cimento C2 | |
|------------|----------------------------|--------|----------------------------|--------|
| | Média (g/cm ³) | CV (%) | Média (g/cm ³) | CV (%) |
| g1 | 0,74 A | 1,28 | 0,68 B | 2,79 |
| g2 | 0,71 A | 5,29 | 0,66 AB | 3,96 |
| t1 | 0,71 A | 6,71 | 0,61 A | 7,22 |
| t2 | 0,80 B | 5,75 | 0,67 AB | 3,91 |
| Média | 0,74 | | 0,65 | |
| p | 0,0153* | | 0,0339* | |

FONTE: O autor (2011)

NOTA: Médias seguidas pelas mesmas letras nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

NA: Não Avaliado

* Significativo ao nível de 95% de probabilidade

- Compósito com cimento C1 - ASTM

De acordo com a Tabela 08, os resultados da avaliação da massa específica aparente obtidos com o cimento C1 apresentaram diferenças estatísticas entre si. Pôde-se notar a diferença do tratamento t2 para os demais, sendo esse o tratamento que apresentou a maior massa específica aparente. Entre os tratamentos, a menor massa específica média foi de 0,71 g/cm³ para os tratamentos com a faixa granulométrica contendo partículas g2 e partículas t1.

O menor coeficiente de variação da média 1,28% foi apresentado pelo tratamento com as partículas de galhos g1, possivelmente devido à maior homogeneidade das amostras apesar de não ter apresentado o menor valor da massa específica. Nesse tratamento destaca-se o valor da média da massa específica aparente, que coincide com a média de todos os tratamentos, e não difere estatisticamente dos tratamentos g2 e t1.

- Compósito com cimento C2 - ASTM

De acordo com a Tabela 08, para os tratamentos que utilizaram na sua composição o cimento C2 observa-se que houve diferença estatística entre os valores das médias das massas específicas aparente apresentadas pelos tratamentos. O menor valor médio para a massa específica ($0,61\text{g/cm}^3$) se apresentou para o tratamento que continha as partículas de troncos t1, porém com o maior coeficiente de variação da média 7,22% entre todos os tratamentos, possivelmente devido a menor homogeneidade da amostra e maior índice de vazios durante o processo de vibro compactação mecânica.

Com valores absolutos diferentes, as médias das massas específicas dos tratamentos g1, g2 e t2 e dos tratamentos g2, t1 e t2 obtidos com o cimento C2 não diferem estatisticamente entre si devido a suas respectivas amplitudes dos coeficientes de variação dos valores dessas médias.

Considerando-se todos os tratamentos elaborados com o cimento C1 e com cimento C2 com os corpos de prova moldados conforme recomendações da norma ASTM D 1037 (1999) adaptada, foram obtidas pela análise estatística diferenças significativas entre as suas respectivas médias da massa específica dos tratamentos e foi possível observar que entre as médias de todos os tratamentos aqueles que continham o cimento C2 se apresentaram com menor massa específica ($0,65\text{g/cm}^3$) quando comparados com aqueles que continham o cimento C1 ($0,74\text{g/cm}^3$).

c) Duas normas distintas fundamentaram a proposta para o estudo comparativo do comportamento do compósito moldado. A norma nacional NBR 5738 (ABNT, 2003) que recomenda a moldagem de cilindros e a norma estrangeira ASTM D 1037 (1999) que recomenda o formato de prisma para obtenção dos corpos de prova.

Esperava-se que a avaliação estatística das médias da massa específica dos tratamentos preconizado pela norma nacional e pela norma estrangeira permitisse demonstrar alguma interferência da forma do corpo de prova sobre o comportamento do volume adensado do compósito no interior dos moldes. Acreditava-se que os cilindros com a ausência de arestas facilitariam o adensamento e situação contrária ocorresse com os prismas devido as suas menores dimensões e a presença das arestas.

No entanto, o valor da média dos tratamentos com cimento C1 pela norma nacional apresentou menor massa específica em relação aos tratamentos com cimento C1 pela norma estrangeira e a mesma tendência foi verificada com os tratamentos que foram preparados com o cimento C2. Portanto, todos os tratamentos que seguiram a recomendação da norma nacional apresentaram o valor da média da massa específica menor comparativamente com os tratamentos que seguiram a recomendação da norma estrangeira.

Considerando-se o menor o volume do conteúdo e a menor dimensão dos moldes para o ensaio com a norma estrangeira, possivelmente a maior proximidade do compósito às paredes do molde introduziu maior propagação da energia do mecanismo de vibro compactação mecânica às partículas justificando-se assim, o maior valor para a média da massa específica entre todos os tratamentos obtidos por esse estudo.

Observando-se os materiais sólidos rotineiramente empregados na construção civil apresentados no Quadro 30 referenciados por Dolabella (2012) como letra (D), Prata (2010) como letra (P) e o Autor (2012) como letra (A), há possibilidade de se estabelecer comparações entre a massa específica desses materiais empregados, para futuramente encontrar aplicações específicas para os compósitos madeira cimento ora estudado que apresentaram os valores das médias dos tratamentos compreendidas entre $0,60\text{g/cm}^3$ e $0,74\text{g/cm}^3$, valores estes que se apresentaram dentro do intervalo das médias de ME do tijolo poroso e do bloco celular autoclavado.

| Material | ME (g/cm³) |
|---------------------------------------|------------------------------|
| Bloco de concreto (D) | 2,2 |
| Concreto para enchimento de pisos (D) | 2,2 a 2,3 |
| Painéis de cimento-amianto (D) | 1,9 |
| Tijolo cerâmico furado (D) | 1,1 a 1,4 |
| Tijolo cerâmico poroso (D) | 1,0 a 1,1 |
| <i>Pinus spp</i> (P) | 0,39 a 0,48 |
| Bloco celular autoclavado (D) | 0,43 a 0,45 |
| Compósito madeira cimento (A) | 0,60 a 0,74 |

QUADRO 30 - MASSA ESPECÍFICA DE MATERIAIS EMPREGADOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL
 FONTE: O autor (2012)

6.5.1.2 pH das partículas

Os resultados apresentados nos ensaios físicos e mecânicos pelo compósito de madeira cimento utilizaram as partículas de galhos e partículas de troncos pré-tratadas com óxido de cálcio hidratado na forma de hidróxido de cálcio. Portanto, essa intervenção química pode ser observada na Tabela 09 mediante a adaptação da norma Tappi 252 (2002).

TABELA 09 - RESULTADOS DO PH DAS PARTÍCULAS DE GALHOS E PARTÍCULAS DE TRONCOS AO EXAME DE IMERSÃO EM ESTADO NATURAL E DEPOIS DE PRÉ-TRATADAS COM HIDRÓXIDO DE CÁLCIO

| Partículas | pH médio em imersão em água | | | |
|-------------------------------|-----------------------------|--------|----------|--------|
| | 2 horas | CV (%) | 24 horas | CV (%) |
| Galhos em estado natural | 5,3 B | 1,04 | 5,3 B | 0,75 |
| Troncos em estado natural | 4,4 A | 2,46 | 4,4 A | 1,62 |
| Galhos + Ca(OH) ₂ | 9,9 C | 3,11 | 10,3 C | 1,60 |
| Troncos + Ca(OH) ₂ | 10,5 D | 1,80 | 10,4 C | 1,06 |
| p | 0,0007** | | 0,0000** | |

FONTE: O autor (2011)

NOTA: Médias seguidas pelas mesmas letras nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

** Altamente significativo ao nível de 95% de probabilidade

Analisando os valores dos resultados do pH médio em imersão em água apresentados na Tabela 09 pode-se observar que:

Os resultados dos valores de pH das partículas de troncos com pH 4,4 em estado natural se identificaram dentro do intervalo para as espécies *Pinus*, estudadas por Prata (2010). Quanto ao pH das partículas galhos em estado natural que foi influenciada pela quantidade de cascas e acículas presentes no conteúdo do insumo apresentando o pH 5,3 próximo dos valores encontrados por Ludwig *et al.* (2008). Depois da adição do hidróxido de cálcio (pH 14) por meio da hidrólise provocada pela solução alcalina depois de duas horas em imersão em água, influenciaram os resultados dos valores passando o pH de partículas de galhos para pH 9,9 e o pH de partículas de troncos pH 10,5.

O pH das partículas em estado natural não apresentaram diferenças estatísticas quando comparadas considerando-se o tempo de imersão de duas horas e de vinte e quatro horas. A alcalinidade das partículas de galhos e das partículas de troncos pré- tratadas com $\text{Ca}(\text{OH})_2$, quando comparada no intervalo de tempo entre duas e vinte e quatro horas, observou-se que se mantiveram com o pH estável.

A alcalinidade é a característica presente nos materiais de construção. Os aglomerantes de origem mineral utilizados são obtidos pela calcinação das rochas de origem calcária na sua fase de produção. No processo de reversão hidráulica, como os cimentos Portland ou aéreo como a cal ocorre a carbonatação em meio alcalino (pH 14). Nesse meio alcalino as partículas vegetais sofrem hidrólise segundo Sjostron (1993), e podem alterar a parede celular. Para os compósitos derivados do cimento Portland, as reações de alcalinidade continuam mesmo depois de decorrido o processo de cura da matriz cimentícia. Portanto, devido as variáveis decorrentes desse processo de carbonatação, deverão ser ao longo do tempo melhor observadas, as reações álcali agregados nos compósitos madeira cimento.

6.5.1.3 Absorção de água e inchamento em espessura

Seguindo as preconizações da Norma ASTM D 1037 (1999) adaptada para avaliação das características físicas de absorção de água e inchamento em espessura dos corpos de prova para painéis de madeira engenheirados permitindo a imersão dos corpos de prova de madeira cimento gerados para esse fim ficarem mergulhados durante 24 horas e os resultados estão na Tabela 10, e na Tabela 11 (p. 136).

TABELA 10 - VALORES MÉDIOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA E INCHAMENTO EM ESPESSURA DO COMPÓSITO COM USO DO CIMENTO C1

| Tratamento | Absorção de água | | | | Inchamento em espessura | | | |
|------------|------------------|------|----------|------|-------------------------|-------|----------|-------|
| | 2h | | 24h | | 2h | | 24h | |
| | Média(%) | CV % | Média(%) | CV % | Média(%) | CV % | Média(%) | CV % |
| g1 | 30,31 B | 1,63 | 37,99 D | 2,46 | 0,24 A | 3,9 | 0,69 A | 49,25 |
| g2 | 29,75 B | 1,28 | 29,75 A | 1,28 | 0,51 A | NA | 0,62 A | NA |
| t1 | 27,51 A | 0,24 | 32,95 C | 1,05 | 0,09 A | NA | 0,55 A | 3,90 |
| t2 | 26,54 A | 1,18 | 31,96 B | 0,55 | 0,10 A | 45,53 | 0,20 A | 121,4 |
| p | 0,0012** | | 0,0005** | | | | | |

FONTE: O autor (2012)

NOTA: Médias seguidas pelas mesmas letras nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

** Altamente significativo ao nível de 99% de probabilidade

NA: Não Avaliado

Dentro desse período de imersão os corpos de prova foram avaliados. Tendo transcorrido duas horas do início do ensaio as médias dos resultados dos valores encontrados, levando-se em consideração que os corpos de prova foram preparados com o cimento C1 e com o cimento C2, foram avaliados estatisticamente, em separado.

Na Tabela 10 pode-se constatar que os valores das médias dos resultados da absorção em água apresentaram diferenças estatísticas entre si. O menor resultado para absorção de água foi apresentado pelos corpos de prova que possuíam na sua composição partículas de galhos g2 depois de 24 horas de imersão e houve uma retenção de 29,75% de água em relação ao início do ensaio, para aqueles que utilizaram o cimento C1. Na mesma faixa granulométrica com partículas g2, com esse menor resultado tem como correspondente o inchamento

em espessura que representou 0,62% de variação da espessura em relação ao início do ensaio.

O tratamento com as partículas de tronco t2 embora não apresentando a menor quantidade relativa de água absorvida (31,96%) possui módulo de finura menor, o qual possibilita a exposição de maior quantidade de superfície específica de partículas. A variação do coeficiente de variação estatística para os valores da absorção de água, possivelmente expressa a água absorvida pelas partículas mais a água retida nos vazios entre as partículas. A água retida, possivelmente interferiu nos resultados dos valores da quantidade de água como um todo.

Entretanto, os valores dos coeficientes de variação estatísticos, como se apresentaram e podem ser observados na Tabela 10 (p. 134), remetem à consideração em que essa variação da amplitude para os resultados do inchamento em espessura podem ser justificados pela dificuldade em se conseguir as leituras dos valores da espessura efetuada na superfície dos corpos de prova devido a rugosidade do compósito madeira cimento.

Embora havendo maior necessidade de aglomerante devido à maior quantidade de superfície específica, esse tratamento com partículas de tronco t2, demonstrou o menor valor para o índice do valor de inchamento em espessura. Possivelmente, justifica-se esse menor índice ao fato desse tratamento ter apresentado a maior massa específica aparente média (0,80 g/cm³) entre os tratamentos com a norma estrangeira e o cimento C1 e poder se apresentar com menor exposição ao contato com a água.

A Tabela 11 apresenta os valores médios de absorção de água e inchamento em espessura e coeficientes de variação dos compósitos obtidos com o cimento C2.

TABELA 11 - VALORES MÉDIOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA E INCHAMENTO EM ESPESSURA DOS COMPÓSITOS COM USO DO CIMENTO C2

| Tratamento | Absorção de água | | | | Inchamento em espessura | | | |
|------------|------------------|-------|----------|------|-------------------------|-------|----------|-------|
| | 2h | CV | 24h | CV | 2h | CV | 24h | CV |
| | Média(%) | % | Média(%) | % | Média(%) | % | Média(%) | % |
| g1 | 36,28 A | 29,51 | 35,84 B | 1,09 | 0,55 A | NA | 0,76 A | 61,51 |
| g2 | 26,60 A | 1,53 | 32,29 A | 1,19 | 0,47 A | 71,02 | 0,49 A | 32,62 |
| t1 | 26,03 A | 4,23 | 32,97 A | 1,63 | 0,53 A | 83,04 | 0,58 A | 121,7 |
| t2 | 29,59 A | 0,07 | 35,66 B | 1,48 | 0,26 A | 48,02 | 0,52 A | 8,41 |
| p | 0,0049** | | | | | | | |

FONTE: O autor (2012)

NOTA: Médias seguidas pelas mesmas letras nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

** Altamente Significativo ao Nível de 99% de Probabilidade

NA: Não Avaliado

Na Tabela 11 pode-se constatar que os valores das médias dos resultados da absorção em água apresentaram diferenças estatísticas entre si ao nível de 95% de probabilidade

A menor absorção de água apresentada pelos corpos de prova depois de 24 horas de imersão pertence aos tratamentos dos corpos de prova que possuíam na sua composição partículas de galhos g2 e no interior do corpo de prova desses tratamentos houve uma absorção que representou um aumento da sua massa em 32,29%. Embora com amplitude do coeficiente de variação estatística (1,19%), para os valores da absorção de água, esse índice possivelmente expressa a água absorvida pelas partículas mais a água retida nos vazios entre as partículas.

Por outro lado, a relação de correspondência ao inchamento em espessura para esse tratamento demonstrou 0,49% de incremento na espessura dos corpos de prova. Possivelmente, associa-se a esse menor valor do inchamento a homogeneidade dos maiores valores da massa específica aparente apresentada pelos tratamentos que possuem o cimento C2 na sua composição que podem ter transferido propriedade de maior impermeabilização às partículas.

Entretanto, houve maior amplitude do coeficiente estatístico da variação das médias. Possivelmente, essas variações apresentadas na Tabela 11 (p. 136) possuem justificativa devido as dificuldades em conseguir a homogeneidade na leitura dos valores da espessura efetuada na superfície dos corpos de prova, por conta da rugosidade apresentada pelo compósito madeira cimento.

O compósito madeira cimento como foi estudado, formado a partir da união de partículas de galhos e partículas de troncos compactados por compactação vibro dinâmica permitiu que a sua estrutura fosse composta com grande número de vazios entre as superfícies laterais das partículas revestidas e unidas pela pasta de cimento Portland. Essa foi uma característica desejável, pois foi trabalhada, desde o início do estudo, visto que, era esperado do compósito, massa específica aparente com os atributos da madeira e a longevidade das peças produzidas com cimento Portland.

O ensaio de absorção de água demonstrou em seus resultados algumas discrepâncias, na massa dos corpos de prova, provavelmente em virtude da permanência de água, por efeito da capilaridade no interior dos vazios desses corpos de prova. Por outro lado, os elementos leves derivados desses compósitos não alcançariam índices de desempenho para funções estruturais e, portanto não poderiam ser utilizados em situações que os expusesse ao ambiente externo.

A característica física representada pelo valor do inchamento em espessura está associada ao comportamento estético que deve ser apresentado por painéis ou blocos quando expostos em construções, devido ao desenvolvimento de juntas de movimentação entre as interfaces das peças durante a fase de vida do projeto.

6.5.1.4 Expansão linear do compósito

Tendo em vista a necessidade do conhecimento do comportamento do compósito quanto à expansão linear foi aproveitado o ensaio preconizado pela norma ASTM D 1037 (1999) adaptada, que forneceu os valores para se estabelecer as médias dessas expansões sobre a superfície do corpo de prova, depois de vinte e quatro horas de imersão em água.

As médias da expansão linear para os compósitos com partículas de troncos e partículas de galhos com o cimento C1 e o cimento C2 e os coeficientes de variação estatísticos preconizados pela norma estrangeira estão apresentados na Tabela 12.

TABELA 12 - VALORES MÉDIOS DE EXPANSÃO LINEAR DO COMPÓSITO MADEIRA CIMENTO

| Tratamento | Compósito com cimento C1 | | Compósito com cimento C2 | |
|------------|--------------------------|--------|--------------------------|--------|
| | Média (%) | CV (%) | Média (%) | CV (%) |
| g1 | 2,07 A | NA | 1,04 A | 46,51 |
| g2 | 1,08 A | 106,16 | 0,89 A | 58,70 |
| t1 | 1,27 A | 129,16 | 0,59 A | 90,42 |
| t2 | 0,76 A | 27,38 | 0,41 A | 39,19 |
| Média | 1,10 | | 0,76 | |

FONTE: O autor (2012)

NOTA: Médias seguidas pelas mesmas letras nas colunas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

NA: Não Avaliado

Depois de analisados estatisticamente os valores dos índices percentuais médios da expansão linear do compósito não diferem entre si.

É possível observar que houve menor expansão linear para os tratamentos que foram obtidos com a faixa granulométrica com menor módulo de finura tanto para partículas de galhos como para partículas de troncos e ocorreu nas duas misturas obtidas com o cimento C1 e com o cimento C2. A menor expansão linear para os tratamentos obtidos com o cimento C1 se apresentaram para o tratamento com partículas de troncos t2 (0,76%).

Os tratamentos obtidos com partículas de troncos t2 com o cimento C2 o valor da expansão linear foi 0,41% ao final do período de imersão de 24 horas. Entretanto, os valores das médias da expansão linear apresentados na Tabela 12, para todos os tratamentos com o cimento C2 apresentaram uma expansão média de 0,76%.

Portanto, menor que a média da expansão linear 1,10% apresentado pelo cimento C1, possivelmente justificada devido a menor impermeabilização transferida para as partículas de troncos e partículas de galhos e que pode ser associada pela menor massa específica aparente nos tratamentos obtidos com o cimento C2.

Os valores das médias da expansão linear com maior coeficiente de variação da média estatística demonstraram a dificuldade de precisão na captura dos valores de leitura das medidas para a composição da média da expansão do corpo de prova devido a rugosidade na face de apoio do instrumento. A heterogeneidade do conteúdo do compósito madeira cimento também pode justificar a variação do coeficiente de variação estatística.

6.5.2 Características Mecânicas

O desempenho do compósito madeira cimento foi demonstrado mediante os resultados dos ensaios para a determinação das características mecânicas quanto a resistência à compressão, o módulo de elasticidade, o módulo de resistência em flexão estática e a resistência à tração interna perpendicular à superfície.

6.5.2.1 Resistência à compressão

Os resultados dos valores das médias dos tratamentos obtidos para a determinação da resistência à compressão dos corpos de prova pelos ensaios realizados e preconizados pela norma nacional apresentados na Tabela 13 e pela norma estrangeira na Tabela 14 (p. 143), tendo em vista a marca de cimento C1 e a marca do cimento C2 utilizadas na preparação do compósito e a respectiva norma adaptada. Os resultados e considerações estão descritos nos itens (a), (b) e (c) a seguir.

a) A Tabela 13 apresenta os resultados dos valores das médias dos ensaios da resistência à compressão e dos coeficientes de variação estatística dos corpos de prova do compósito cimento madeira utilizando-se a marca do cimento C1 e a marca do cimento C2 e observando-se as normas NBR 5738 (ABNT, 2003) adaptada para esses ensaios.

TABELA 13 - MÉDIAS DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO - ABNT

| Tratamentos | Cimento C1 | | Cimento C2 | |
|-------------|-------------------------------|--------|--------------------------------|--------|
| | Médias (kgf/cm ²) | CV (%) | Médias (kgf/ cm ²) | CV (%) |
| g1 | 6,49 A | 47,72 | 2,78 A | 5,08 |
| g2 | 5,40 A | 4,71 | NA | NA |
| t1 | 3,26 A | 28,63 | 4,64 A | 18,41 |
| t2 | 5,60 A | 2,02 | 5,40 A | 25,51 |
| Média | 5,19 | | 4,27 | |

FONTE: O autor (2012)

NOTA: Médias seguidas pelas mesmas letras nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

NA: Não Avaliado

- Compósito com cimento C1 – ABNT

Os resultados do ensaio de resistência à compressão axial, depois de analisados estatisticamente não apresentaram diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos do compósito produzidos com o cimento C1. Ao se analisar os valores da Tabela 13 (p. 140) verifica-se que o maior valor da média de resistência à compressão 6,49 kgf/cm² foi obtida com o uso de partículas de galhos g1 apresentando o maior coeficiente de variação estatística 47,72%.

Os tratamentos com as partículas com a faixa granulométrica com menor módulo de finura para os galhos g2 e para os troncos t2 apresentaram a resistência à compressão mais próxima da média de todos os tratamentos obtidos com o cimento C1 e se apresentaram com menor coeficiente de variação das suas médias, isto é 4,71% para o tratamento g2 e 2,02% para o tratamento t2.

Embora não apresentando a maior média de resistência à compressão o tratamento g2 e o tratamento t2 possibilitam maior confiança no aceite dos seus resultados por apresentarem menores coeficientes de variação dos valores da média de resistência à compressão. Justifica-se esse aceite devido a demonstração mais homogênea da massa específica aparente desses tratamentos desenvolvida durante o processo de adensamento por vibro compactação mecânica.

- Compósito com cimento C2 - ABNT

Os compósitos produzidos com o cimento C2 apresentaram resistências a compressão na média dos tratamentos 9,5% maiores que as produzidas com o cimento C1. O melhor resultado foi apresentado pela média dos corpos de prova produzidos com as partículas de troncos t2 com valor de 5,40kgf/cm² com maior coeficiente de variação estatística da média 25,51%. Por outro lado os menores valores foram determinados para os compósitos produzidos com o cimento C2 e ficaram por conta dos corpos de prova produzidos com partículas de galho g1 (2,78 kg/cm²) com coeficiente de variação da média em 5,08%.

Entretanto, demonstrando maior valor do coeficiente de variação da média o tratamento t1 e o tratamento t2 se apresentam com valores de suas respectivas médias próximo do valor da média entre todos os tratamentos com o cimento C2. Justifica-se a variação desses coeficientes de variação da média, pois durante o processo de adensamento por vibro compactação aconteceram regiões de com maior e menor concentração de partículas no interior do corpo de prova que, por sua vez, em determinadas situações de recepção da carga de prova modificaram o eixo de aplicação dessa carga, possivelmente gerando valores com menor homogeneidade.

Na Figura 20 (A) e Figura 20 (B) visualizam-se as linhas de tendências obtidas por meio de regressão linear dos valores da resistência média a compressão relacionada aos valores médios da massa específica dos tratamentos preconizada pela norma nacional para os tratamentos com o cimento C1 e o cimento C2, ao nível de 95% de probabilidade. Para esses tratamentos existe fraca correlação expressa respectivamente pelos coeficientes de determinação por $R^2 = 0,0077$ e $R^2 = 0,3999$ entre as médias da resistência a compressão dos tratamentos e as médias da massa específica.

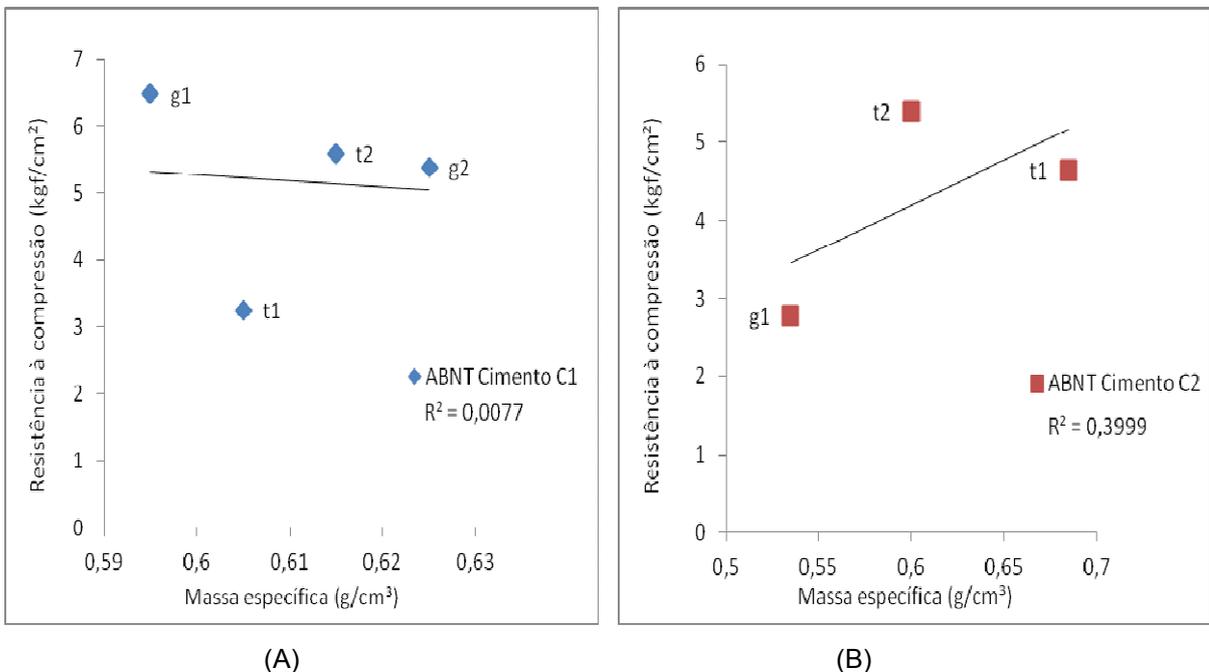


FIGURA 20 - LINHA DE TENDÊNCIA DA MÉDIA DOS RESULTADOS DO ENSAIO MECÂNICO DE RC EM FUNÇÃO AO ENSAIO FÍSICO DA ME COM USO DO CIMENTO C1 E DO CIMENTO C2 - NORMA ABNT

FONTE: O autor (2012)

NOTA: (A) $RC = - 18,75 + 38*ME$

(B) $RC = - 2,601 + 11,331*ME$

b) A Tabela 14 apresenta os resultados dos valores das médias dos ensaios da resistência à compressão e os coeficientes de variação estatística das médias dos valores dos corpos de prova do compósito madeira cimento que, utilizaram a marca do cimento C1 e a marca do cimento C2, observando a norma ASTM D 1037 (1999) adaptada para esse ensaio.

TABELA 14 - MÉDIAS DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO – ASTM

| Tratamentos | Cimento C1 | | Cimento C2 | |
|------------------------------|-------------------------------|--------|-------------------------------|--------|
| | Médias (kgf/cm ²) | CV (%) | Médias (kgf/cm ²) | CV (%) |
| g1 | 4,77 A | 13,07 | 5,12 B | 14,72 |
| g2 | 8,55 B | 12,13 | 2,25 A | 36,14 |
| t1 | 4,67 A | 37,24 | 1,91 A | 20,57 |
| t2 | 9,35 B | 29,95 | 2,65 A | 24,18 |
| Média (kgf/cm ²) | 6,83 | | 2,98 | |
| p | 0,036* | | 0,001** | |

FONTE: O autor (2012)

NOTA: Médias seguidas pela mesmas letras nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

* Significativo ao Nível de 95% de Probabilidade

** Altamente significativo ao nível de 99% de probabilidade

- Compósito com cimento C1 - ASTM

Os resultados do ensaio de resistência à compressão axial, depois de analisados estatisticamente corresponderam aos valores da Tabela 14 e apresentaram diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos do compósito com cimento C1 ao nível de 95% de probabilidade.

Os maiores valores das médias para a resistência à compressão 8,55 kgf/cm² e 9,35 kgf/cm² foram para os tratamentos g2 e t2 respectivamente, com o menor módulo de finura que não diferem estatisticamente entre si, embora apresentassem amplitude entre os seus coeficientes de variação estatística. Pela análise de comparação das médias pelo método de Tukey a 95% de probabilidade aparecem dois grupos distintos, quanto à resistência à compressão, formados pelos tratamentos que continham partículas com as mesmas faixas granulométricas.

Por outro lado entre os tratamentos com as partículas de galho g1 e partículas de galhos g2 entre os valores das médias da resistência a compressão se observa diferença.

O aceite desses valores da média da resistência a compressão justificam a maior confiança devido a maior homogeneidade entre seus respectivos coeficientes de variação dessas médias. O formato dos moldes para os corpos de prova em prismas com pequenas dimensões, de acordo com a recomendação da norma estrangeira, possivelmente influenciou na variação dos valores das médias da resistência à compressão apresentadas entre os tratamentos com partículas de troncos e partículas de galhos.

- Compósito com cimento C2 - ASTM

Entre os tratamentos produzidos com o cimento C2, o maior valor para a resistência à compressão $5,12 \text{ kgf/cm}^2$ foi encontrado no tratamento que continha partículas de galhos g1 na sua composição e apresentou o menor coeficiente de variação estatística da média $14,72\%$, entre esses tratamentos.

Para os tratamentos preparados com o cimento C1 e o cimento C2 e a norma estrangeira, conforme Figura 21 (A) e Figura 21 (B), os coeficientes de determinação foram expressas respectivamente por $R^2 = 0,2787$ e $R^2 = 0,5398$.

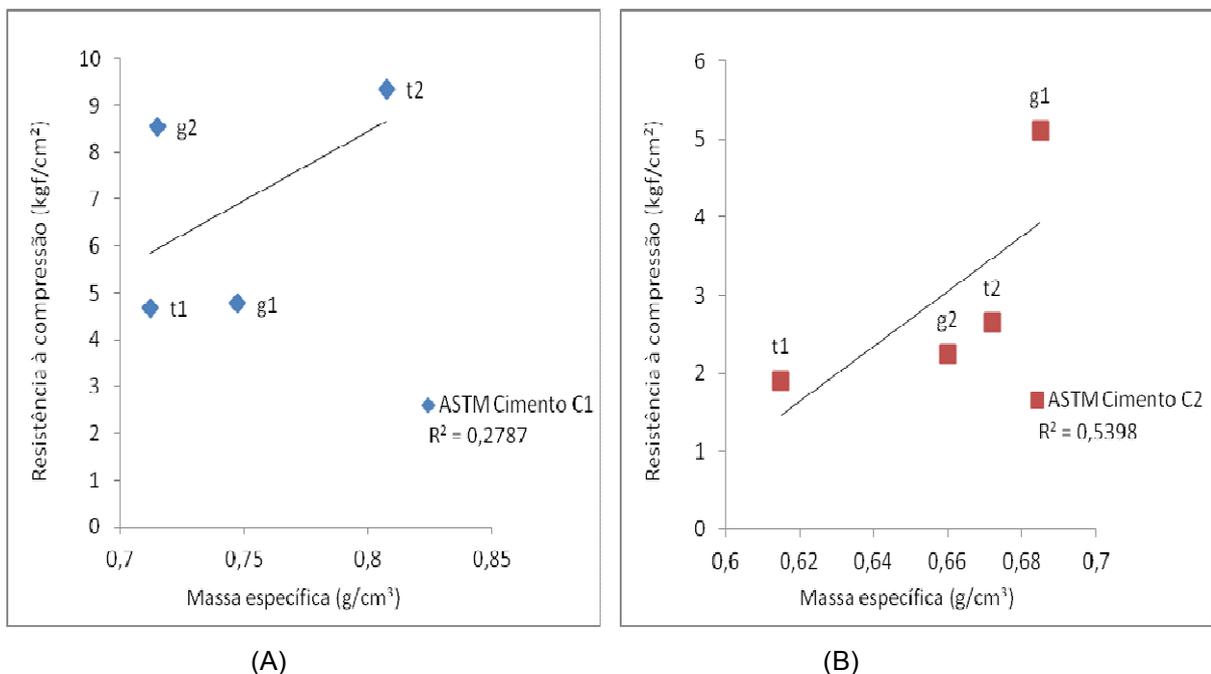


FIGURA 21 - LINHA DE TENDÊNCIA DA MÉDIA DOS RESULTADOS DO ENSAIO MECÂNICO DE RC EM FUNÇÃO DO ENSAIO FÍSICO DA ME COM USO DO CIMENTO C1 E DO CIMENTO C2 - NORMA ASTM

FONTE: O autor (2012)

NOTA: (A) $RC = - 15,032 + 29,337*ME$

(B) $RC = - 20,161 + 35,173*ME$

Os tratamentos com as partículas de galhos g2 e os tratamentos com as partículas de troncos t1 e t2 apresentaram menores valores para as suas respectivas médias de resistência à compressão e maiores coeficientes de variação dessa média quando comparadas com o resultado apresentado pelo tratamento com partículas de galhos g1.

O maior resultado da resistência à compressão possivelmente foi devido a recepção da energia de compactação vibro dinâmica sobre as partículas g1 durante o processo de adensamento do compósito madeira cimento.

Entretanto, associam-se a essas fracas correlações, à região da interface entre a matriz cimentícia e as partículas de agregados leves conhecida como zona de transição dos compósitos, como explica (Mehta; MONTEIRO, 2008).

c) Considerando-se os dois casos estudados e observando-se a linha de tendência representada na Figura 21 (A) e Figura 21 (B) (p. 144), os tratamentos obtidos com a norma estrangeira que apresentaram maior massa específica aparente, possivelmente justificam o maior coeficiente de relação, embora fraco, entre a propriedade física da massa específica e a propriedade mecânica da resistência à compressão.

Entretanto, pode-se ponderar da observação conjunta da Figura 20 (p. 142) e da Figura 21 (p. 144), embora com a heterogeneidade da distribuição dos valores das médias para o compósito desse estudo, possivelmente houve uma influência discreta entre a resistência à compressão e a massa específica aparente. Porém, os tratamentos obtidos com o cimento C2 e a norma estrangeira mesmo apresentando os menores valores das médias de resistência a compressão demonstraram estatisticamente o melhor coeficiente de correlação, expresso por $R^2 = 0,5398$ denotando a influência da massa específica aparente em relação à resistência a compressão do compósito.

A resistência à compressão é a característica mecânica que confere aos compósitos de cimento Portland a garantia para o seu uso como elemento construtivo (Mehta; MONTEIRO, 2008). Devido ao estudo estatístico, essa característica pode transmitir confiança do desempenho que os elementos compósitos sólidos empregados nos processos construtivos e, a partir desse estudo podem ser classificados, como internos ou externos, estruturais e de vedação.

Segundo Mehta e Monteiro (2008) e Schmid (2005) os elementos componentes para as construções podem expressar por meio da propriedade física correspondente à massa específica e a propriedade mecânica correspondente à resistência à compressão, atributos para a melhor adequação e desempenho desses elementos nos ambientes construídos. Possivelmente, os compósitos madeira cimento por meio dessas propriedades estudadas poderão se adequar atendendo as necessidades a que forem destinadas.

6.5.2.2 Resistência à tração perpendicular às superfícies – Ligação Interna

Os resultados dos valores das médias dos tratamentos obtidos para a determinação da resistência à tração perpendicular as fibras e o coeficiente de variação estatística da média dos corpos de prova. Os resultados estão apresentados na Tabela 15, atendidas as preconizações da norma EN 319 (EN, 2002) adaptada, para a marca de cimento C1 e a marca do cimento C2 utilizadas na preparação do compósito.

TABELA 15 - VALORES DAS MÉDIAS DAS RESISTÊNCIAS À TRAÇÃO PERPENDICULAR ÀS SUPERFÍCIES - LIGAÇÃO INTERNA - EN

| Tratamento | Cimento C1 | | Cimento C2 | |
|------------|------------------------------|--------|------------------------------|--------|
| | Média (kgf/cm ²) | CV (%) | Média (kgf/cm ²) | CV (%) |
| g1 | 1,23 A | 54,59 | 1,62 B | 22,25 |
| g2 | 1,09 A | 42,12 | 1,41 B | 27,90 |
| t1 | 1,36 A | 53,49 | 0,37 A | 21,22 |
| t2 | 0,91 A | 8,72 | 0,20 A | 28,83 |
| Média | 1,15 | | 0,90 | |
| p | 0,0000** | | | |

FONTE: O autor (2012)

NOTA: Médias seguidas pelas mesmas letras nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

** Significativo ao Nível de 99% de Probabilidade

- Compósitos com o cimento C1

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 15 a avaliação da ligação interna obtidas com o cimento C1 não apresentaram diferenças estatísticas entre si.

O maior valor da média para a ligação interna foi para o tratamento com partículas de troncos t1. Os tratamentos com as partículas de galhos g1 e g2 demonstraram valores médios para a ligação interna mais próxima da média entre todos os tratamentos obtidos com o cimento C1. Entretanto, houve menor amplitude no coeficiente de variação da média do tratamento tronco t2, possivelmente atribuído a influência da ligação proporcionada pelas fibras disponíveis para ligação entre as partículas mineralizadas.

- Compósitos com cimento C2

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 15 (p. 147) a avaliação da ligação interna obtida com o cimento C2 apresentou diferenças estatísticas significativa entre si. O valor da média para os tratamentos produzidos com partículas de galhos g1 apresentou o valor em $1,62 \text{ kgf/cm}^2$, seguido pelo valor da média do tratamento g2 em $1,41 \text{ kgf/cm}^2$. Embora apresentando coeficientes de variação estatística da média com valores acima de vinte por cento possivelmente evidenciando menor homogeneidade das amostras.

As partículas do compósito madeira cimento estudada se tornaram parcialmente calcárias, devido ao revestimento atribuído ao pré-tratamento com hidróxido de cálcio antes da mistura e mesmo durante a mistura com a pasta de cimento Portland. Segundo Mehta e Monteiro (2008), os resultados da resistência à tração para os compósitos que utilizam fibras podem apresentar relevância e um aumento relativo dessa característica mecânica em um compósito atribuído a uma interação química entre o hidróxido de cálcio presente na pasta de cimento e o agregado mineral.

As quantidades de fibras nos tratamentos que possuem partículas de galhos, devido a presença das cascas, possivelmente contribuíram para que os resultados das médias desses tratamentos se apresentassem maiores em conjunto, entre os valores das médias da ligação interna dos compósitos com as duas marcas de cimento.

6.5.2.3 Módulo de elasticidade e ruptura à flexão estática - MOE e MOR

Entre as características mecânicas apresentadas pelos compósitos madeira cimento de acordo com a norma estrangeira EN 310 (EN, 2002), os indicadores para a resistência aos esforços de flexão simples explicitados pelo módulo de elasticidade à flexão estática (MOE) e módulo de ruptura à flexão estática (MOR) e os coeficientes de variação das médias estão apresentados na Tabela 16, a seguir.

TABELA 16 - VALORES MÉDIOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE E MÓDULO DE RUPTURA DO COMPÓSITO MADEIRA CIMENTO COM USO DO CIMENTO C1 E DO CIMENTO C2

| Tratamento | Cimento C1 | | | | Cimento C2 | | | |
|------------|------------|--------|-----------|--------|------------|--------|-----------|--------|
| | MOE (MPa) | CV (%) | MOR (MPa) | CV (%) | MOE (MPa) | CV (%) | MOR (MPa) | CV (%) |
| g1 | 59,17 A | NA | 0,09 A | 44,44 | 262,65 B | 20,34 | 0,29 AB | 51,83 |
| g2 | 220,70 A | 73,09 | 0,20 BC | 22,70 | 255,55 B | 24,92 | 0,37 B | 7,71 |
| t1 | 181,23 A | 2,89 | 0,16 AB | 23,93 | 130,31 AB | NA | 0,16 A | 37,5 |
| t2 | 170,19 A | 39,14 | 0,29 C | 25,65 | 111,90 A | 42,32 | 0,19 AB | 35,89 |
| Média(MPa) | 180,52 | | 0,185 | | 199,01 | | 0,255 | |
| p | 0,0012** | | | | 0,0154* | | 0,0237* | |

FONTE: O autor (2012)

NOTA: Médias seguidas pelas mesmas letras nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

* Significativo ao Nível de 95% de Probabilidade

** Significativo ao nível de 99% de Probabilidade

NA: Não Avaliado

▪ Compósitos com o cimento C1

O comportamento mecânico apresentado pelo MOE e avaliado estatisticamente não apresentou diferença significativa entre si. O tratamento g2 apresentou o maior resultado para a média do MOE, entretanto os tratamentos com as partículas t1 e t2 apresentaram os seus respectivos valores mais próximos do valor da média entre todos os tratamentos e os coeficientes de variação da média do MOE demonstraram heterogeneidade entre os tratamentos obtidos com o cimento C1.

Os valores das médias para o MOR diferem estatisticamente entre si. O valor da média do MOR apresentado pelo tratamento t2 com o cimento C1 demonstrou o maior valor médio entre os demais tratamentos. A observação do valor da média do MOR entre todos os tratamentos com o cimento C1 revelou que as médias que mais

se aproximaram foram as pertencentes aos tratamentos g2 e t1 embora mantendo maior amplitude considerando-se o valor da média do MOR e o coeficiente de variação média para o tratamento g1.

A Figura 22 representa as linhas de tendências obtidas por meio de regressão linear correspondentes aos valores médios de MOE e MOR em relação aos valores médios da massa específica dos tratamentos. Na Figura 22 a linha superior denota a tendência do MOE em relação a ME com o coeficiente de determinação $R^2 = 0,0501$ ao nível de 95% de probabilidade. A linha inferior do gráfico dessa figura mostra a tendência do MOR em relação a mesma ME com $R^2 = 0,3693$ ao nível de 95% de probabilidade, para cimento C1.

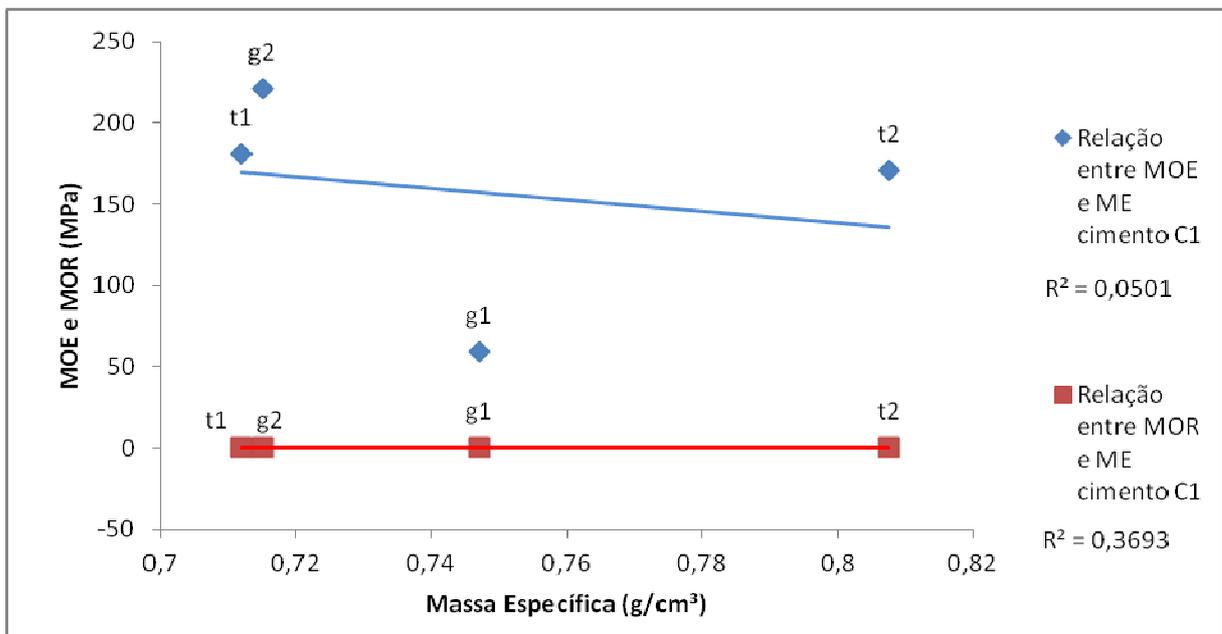


FIGURA 22 - LINHAS DE TENDÊNCIA LINEAR DA MÉDIA DOS RESULTADOS DO ENSAIO MECÂNICO À FLEXÃO SIMPLES - MOE E MOR - EM FUNÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA

FONTE: O autor (2012)

NOTA: $MOE = 418,54 - 349,67 \cdot ME$

$MOR = -0,6676 + 1,1439 \cdot ME$

- Compósitos com o cimento C2

Na Figura 23 com o cimento C2 os tratamentos com partículas de galhos apresentaram os seus maiores valores entre todas as médias dos tratamentos e a linha apresentada na parte superior da Figura 23, explicita a relação entre o MOE e a ME com o coeficiente de determinação entre as variáveis explicitado por $R^2 = 0,2547$ ao nível de 95% de probabilidade. A linha inferior dessa figura mostra a tendência do MOR em relação a mesma ME com o coeficiente de determinação explicitado por $R^2 = 0,2724$ ao nível de 95% de probabilidade.

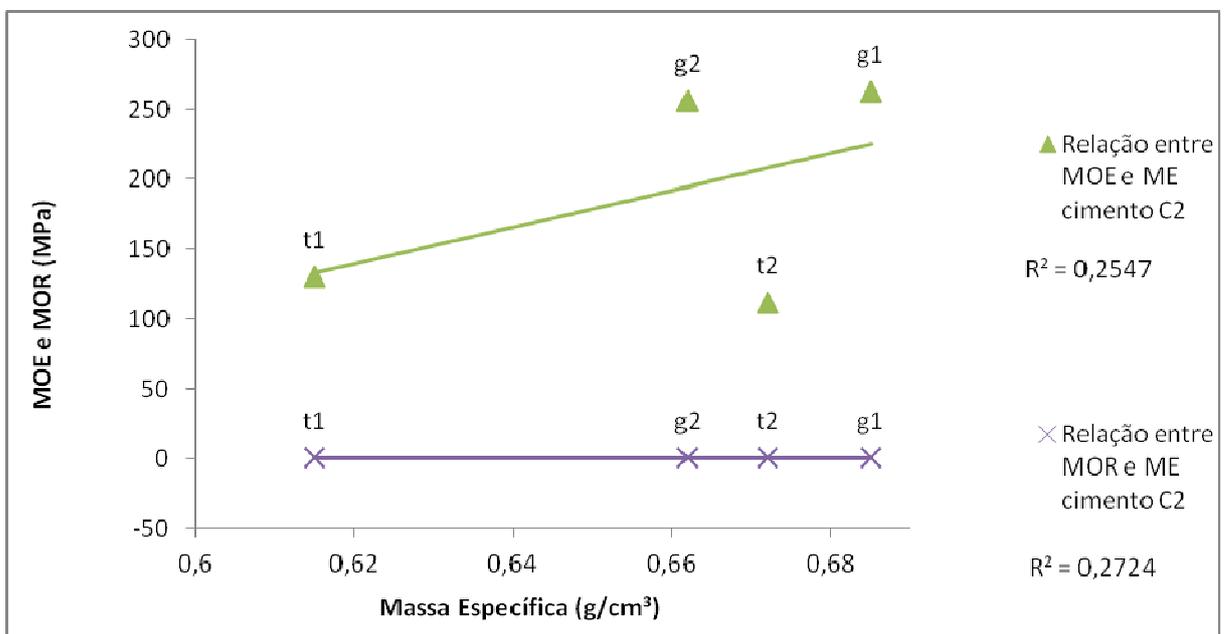


FIGURA 23 - LINHAS DE TENDÊNCIA LINEAR DA MÉDIA DOS RESULTADOS DO ENSAIO MECÂNICO À FLEXÃO SIMPLES – MOE E MOR - EM FUNÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA

FONTE: O autor (2012)

NOTA: $MOE = - 682,74 + 1325,5 * ME$

$MOR = - 0,83 + 1,644 * ME$

Os valores do MOE para os tratamentos que utilizaram as partículas de galhos e partículas de troncos e o cimento C2 diferem estatisticamente entre si. Para aquelas que utilizaram as partículas de galhos g1 e galhos g2, o valor da média dos resultados desses tratamentos foram maiores que a média entre todos os tratamentos. Os tratamentos g1 e t1 com maior módulo de finura apresentaram discrepância e, entre o valor da média do tratamento g1 para o valor da média do tratamento t1 superou 100% de diferença.

Os tratamentos com o cimento C2 diferem estatisticamente entre si e o tratamento com as partículas de galhos g2 se apresentou com a maior média entre todos os tratamentos para o MOR. Os tratamentos preparados com as partículas de troncos g1 e g2 foram responsáveis pelos maiores valores das médias, entretanto houve amplitude entre os coeficientes de variação da média para o valor do MOR.

Os corpos de prova preparados para o ensaio de flexão estática simples devido a sua geometria apresentaram limitações para esse ensaio. Portanto, não puderam ser avaliados três corpos de prova com cimento C1 e três corpos para o cimento C2. Entretanto, os resultados das médias dos ensaios representados pelos valores de MOE e MOR demonstraram fragilidade do compósito madeira cimento, possivelmente afetados pela relação entre as dimensões dos corpos de prova preparados para esse ensaio. A fragilidade pode ser atribuída à norma utilizada, quando da adaptação das dimensões dos corpos de prova tornando-os esbeltos, representados na Figura 24. Porém, é possível, diante da fragilidade apresentada, observar que os compósitos obtidos a partir das partículas de galhos apresentaram os maiores resultados para o MOE e para o MOR e se deve considerar que esses maiores resultados podem ter sido decorrentes do pré-tratamento com melhor envolvimento calcário por essas partículas.



(A)



(B)

FIGURA 24 - ENSAIO DE FLEXÃO ESTÁTICA SIMPLES

(A) IMAGEM DO INÍCIO DO ENSAIO DE FLEXÃO ESTÁTICA

(B) IMAGEM DA FRAGILIDADE DO CORPO DE PROVA DEVIDO AS DIMENSÕES

FONTE: O autor (2012)

No Quadro 31 referenciado por Climatex (2012) como letra (C), Hebel (2012) como letra (H) e o Autor (2012) como letra (A), observa-se comparativamente o compósito madeira cimento estudado com outros materiais leves disponíveis para uso na construção.

| MATERIAL | MOE (MPa) | MOR (MPa) |
|---|------------------|------------------|
| Compósito madeira cimento espessura do corpo de provas 75 mm (fibras Excelsior) (C). | 406 | 1,32 |
| Bloco celular autoclavado (H). | 1100 a 1400 | 0,44 |
| Compósito madeira cimento espessura 25 mm (partículas de galhos g2 com cimento C2) (A). | 255 | 0,37 |

QUADRO 31 - VALORES DE MOE E MOR DE MATERIAIS DE BAIXA DENSIDADE
 FONTE: O autor (2012)

Segundo Mehta e Monteiro (2008), os resultados das avaliações do ensaio de tração para os compósitos com conteúdo de fibras são relevantes. No presente estudo, a associação do conteúdo de fibras ao efeito da alcalinidade nas partículas de galhos, devido ao pré-tratamento, possivelmente contribuíram para os maiores resultados dos valores das médias dos tratamentos, entre MOE e MOR na flexão estática, embora os corpos de prova apresentassem fragilidade devido as suas relações entre as dimensões.

6.6 CONCLUSÃO

A investigação experimental conduziu ao desenvolvimento do estudo de um compósito madeira cimento com predados próprios que evidenciaram algumas propriedades físicas e mecânicas desse composto.

O cimento Portland CP II – Z provenientes dos dois fabricantes aglutinou as partículas de galhos e troncos nas suas duas faixas granulométricas e concedeu ao compósito madeira cimento de baixa densidade, característica sólida e depois de avaliados apresentaram propriedades físicas e mecânicas suficientes.

A moldagem por compactação vibro dinâmica, conformou e compactou os corpos de prova cilíndricos, prismáticos e em painéis.

O pré-tratamento das partículas quer de galhos quer de troncos com hidróxido de cálcio reduziu o fenômeno da inibição.

A secagem ao ar dos corpos de prova sem necessidade de prensagem e de grampeamento cumpriu o seu objetivo de enrijecimento para os compósitos madeira cimento.

Considerando as características físicas e mecânicas, o método de produção do compósito madeira cimento pesquisado, e a cura ao ar, introduzi-lo como material de construção, onde a conformidade às normas de construção devem ser respeitadas, as vantagens apresentadas, pela sua massa específica, pela sua variação linear, pela sua resistência à compressão, pela sua ligação interna, foram evidenciadas na avaliação dos resultados satisfatórios apresentados e, pertence ao compósito, com as partículas de galhos de *Pinus* spp, que continham os resíduos das cascas e das acículas.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo em vista os resultados e as análises dos ensaios físicos e mecânicos realizados nesse trabalho foi possível concluir que:

- O cimento Portland usado como aglomerante possibilitou a obtenção de um compósito madeira cimento de baixa densidade moldado em forma de sólidos e painéis.
- O pré-tratamento aplicado às partículas, com o uso do hidróxido de cálcio, demonstrou reduzir o efeito da inibição e contribuir com o início de cura da pasta de cimento Portland misturada às partículas de galhos e partículas de troncos;
- O comportamento do compósito foi influenciado pelas duas faixas granulométricas das partículas de galhos e das partículas de troncos utilizadas, durante a mistura, durante a moldagem no interior nos corpos de prova e, nos resultados dos ensaios físicos e dos ensaios mecânicos realizados;
- A vibração dinâmica aplicada ao compósito madeira cimento demonstrou e possibilitou a compactação e a aglutinação entre as partículas de galhos e as partículas de troncos de *Pinus* spp, provenientes de desbaste de reflorestamentos;
- As ações de prensagem e grampeamento no compósito madeira cimento pós-moldado foram dispensadas pela suficiente compactação proporcionada pela vibração mecânica aplicada ao compósito.
- O compósito madeira cimento de baixa densidade, pós-moldado apresentou suficiente compactação proporcionada pela vibração dinâmica aplicada ao compósito, sem a ação de prensagem e grampeamento.

Com as considerações proporcionadas por esse estudo acredita-se que a inserção nas construções civis, de compósitos, com insumos provenientes de fontes renováveis da natureza, com baixa densidade e custos acessíveis, serão possíveis

para a introdução da produção de elementos de madeira cimento moldados com a forma geométrica desejada e comportamento estável, para o manuseio, armazenamento e transporte das peças produzidas.

8 RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Quanto à continuação desse estudo sugere-se a investigação de outros trabalhos na mesma linha de compósitos leves com:

- Espécies vegetais folhosas especialmente de média e baixa densidade;
- Outros de resíduos vegetais ou aparas da indústria de painéis compensados a serem incorporados depois de tratados com óxido de cálcio;
- Avaliações quanto à presença dos extrativos da madeira e as respectivas reações decorrentes com a matriz cimentícia ao longo do tempo;
- Avaliações das reações álcali agregados vegetais;
- Avaliações de envelhecimento acelerado;
- O benefício legal pela introdução de resíduos vegetais na construção;

REFERÊNCIAS

- ADRIAZOLA, M. K. O. **Avaliação experimental por meio de protótipos e por simulação de painéis de madeira para habitação de interesse social**. 2008. 293f. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1884/17916>>. Acesso em: 23/03/2012.
- AGOPYAN, V. In: **Inovação em construção civil**: monografias. São Paulo: Instituto UNIMEP. 2005. p. 67- 84.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. **ASTM D 1037 (1999)**: Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particles Panel Materials. West Conshohocken, United States, 1999.
- ANDERSON, L. O. **How to build a wood-frame house**. New York: Dover, 1973.
- APA - The Engineered Wood Association (APA). Disponível em: <<http://www.apawood.org/>>. Acesso em: 25/02/2012.
- ARAGÃO FILHO, L. A. C. M. de. **Materiais de construção II - Agregados**. Disponível em: <<http://aquarius.ime.eb.br/~moniz/matconst2/conc02.pdf>>. Acesso em: 23/08/2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Básico sobre cimento**. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/conteudo/basico-sobre-cimento/adicoes/vantagens>>. Acesso em: 08/07/2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CONSTRUÇÃO INDUSTRIALIZADA. **Manual Técnico de Alvenaria**. São Paulo, ABCI/PROJETO, 1990.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: concreto – procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003.
- _____. **NBR 7190**: projetos de estrutura de madeira – especificação. Rio de Janeiro, 1997.
- _____. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2005.
- _____. **NBR 8953**: concreto para fins estruturais - classificação por grupos de resistência – Classificação. Rio de Janeiro, 2009.
- _____. **NBR 11578**: cimento Portland composto – especificação. Rio de Janeiro, 1991.
- _____. **NBR 12655**: concreto de cimento Portland - preparo controle e recebimento – Procedimento. Rio de Janeiro, 2006.
- _____. **NBR 13749**: revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – especificação. Rio de Janeiro, 1996.

_____. **NBR 15575**: edificações até cinco edifícios habitacionais de até cinco pavimentos – desempenho. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS (ABRAF). **Anuário estatístico da ABRAF 2012 - ano base 2011**. Disponível em: <<http://www.abraflor.org.br/estatisticas.asp>>. Acesso em: 27/03/2012.

BENDTSEN, E. **Mechanical Properties of 23 species of extern hardwoods**. Disponível em: <<http://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=umn.31951d03009064w;page=root;view=image;size=100;seq=2;num=2>>. Acesso em: 13/02/2010.

BERALDO A. L. *et al.* **Compósitos à base de resíduos vegetais e cimento portland**. Disponível em: <http://www.apuama.org/admin/arquivos/pdfs/residuos_cimento.pdf>. Acesso em: 12/09/2011.

BIBLIOTECA DIGITAL BRASILEIRA DE TESES E DISSERTAÇÕES (BDTD). Disponível em: <<http://bdt.d.ibict.br/>>. Acesso em: 15/02/2011.

CEOTTO, L. H. In: **Inovação em construção civil: monografias**. São Paulo: Instituto UNIMEP. 2005. p. 85-104.

CLIMATEX. Especificações Técnicas. Disponível em: <<http://www.climatex.ind.br/port/certificados.asprt/certificados.asp>>. Acesso em: 22/02/2012.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 307, de 5 de Julho de 2002: **Critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res02/res30702.html>>. Acesso em: 22/02/2012.

CONSELHO REGIONAL DE ENGENHARIA E AGRONOMIA (CREA-PR). **Consulta Pública**. Disponível em: <<http://creaweb.crea-pr.org.br/consultas/menupub.asp>>. Acesso em: 12/03/2012.

COSTA, A. **Coletâneas de anatomia da madeira**. Disponível em: <<http://www.joinville.udesc.br/sbs/professores/arlindo/materiais/APOSTILANATOMIA1.pdf>>. Acesso em: 13/02/2012.

CONSULTEC. In: SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). **Relatório Anual de 2010**. Disponível em: <http://www.snic.org.br/pdf/Historia_do_Cimento_no_Brasil.pdf>. Acesso em: 08/08/2011.

CURITIBA. Decreto n. 1068, de 18 de novembro de 2004. Institui o **Regulamento do Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil do Município de Curitiba** e altera disposições do Decreto n. 1.120/97. Disponível em: <<http://www.curitiba.pr.gov.br/servicos/MeioAmbiente/legislações/D1068.pdf>>. Acesso em: 22/08/2011.

CURITIBA. Lei n. 11682, de 6 de abril de 2006. Dispõe sobre: **O Programa Municipal de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil em Curitiba – PROMGER**. Disponível em:

<<http://www.sindusconpr.com.br/downloads/Lei%20mun%20gerenciamento%20de%20residuos%20da%20const.doc>>. Acesso em 22/08/2011.

DOLABELLA, R. **Peso específico de materiais**. Disponível em:

<<http://www.ricardodolabella.com/downloads/pesosespecificos.doc>>. Acesso em: 16/01/2012.

ENCICLOPÉDIA BRITÂNICA ON LINE. Verbete. Disponível em:

<<http://www.britannica.com/search?query=engeneering>>. Acesso em: 20/06/2010.

ELTOMATION WOOD CEMENT BOARD PLANTS. **Eltomation Reference List**.

Barneveld Holland, 2012. 1 folder.

Disponível em: <<http://www.eltomation.com/Eng/references.html>>. Acesso em: 22/02/2012.

EVANS, P. D. **Wood-Cement in Ásia-Pacific Region**. Disponível em:

<<http://aci.gov.au/files/node/325/chapter1.pdf>>. Acesso em: 08/07/2011.

EUROPEAN STANDARD. **EN 310**: Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength. Versão portuguesa, 2002.

EUROPEAN STANDARD. **EN 319**: Determinação da resistência à tração perpendicular às faces da placa. Versão Portuguesa, 2002.

EUROPEAN STANDARD. **EN 323**: Determinação da densidade. Versão Portuguesa, 1993.

FERREIRA, M. A. **Sistemas construtivos inovadores**. Disponível em:

<http://www.dptoce.ufba.br/construcao1_arquivos/08%20Sistemas%20construtivos%20inovadores.pdf>. Acesso em: 23/10/2010.

FOELKEL, C. E. B. **Estrutura da madeira**. São Paulo: Associação Técnica Brasileira de Celulose e Papel. Divisão de Ensino, 1970.

FREITAS JR, J. de A. *et al*. Importância do concreto na geração de CO₂ em um caso de obra de um edifício. In: 52º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2010, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza, 2010.

FRIBORT, S. *et al*. **Cement bonded composites- a mechanical review**. Disponível em:

<http://www.ncsu.edu/bioresources/BioRes_03/BioRes_03_2_0602_Frybort_MTM_Cement_bonded_composites_Review.pdf>. Acesso em: 18/06/2011.

GEHBAUER, F. **Racionalização na Construção Civil**. Recife: Projeto competir (SENAI, SEBRAE, GTZ), 2004.

GUSTAVSSON, L. **Variability in energy and carbon dioxide balances of wood and concrete building materials.** Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V23-4G82XWV3&_user=10&_coverDate=07%2F31%2F2006&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_origin=search&_sort=d&_docanchor=&view=c&_searchStrId=1457272359&_rerunOrigin=scholar.google&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=24ed43950ddb81b22d75e0e08d387455&searchtype=a>. Acesso em: 09/09/2011.

HEBEL. **Especificação técnica.** Disponível em: <http://www.hebelaustralia.com.au/downloads/uploaded/Section%202-3_c9d9.pdf>. Acesso em: 22/02/2012.

HELENE, P. R. L. **Revista Técnica**, São Paulo, n. 39, mar. 1999. p. 14-17. Entrevista.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SP (IPT). **Catálogo de processos e sistemas construtivos para habitação.** 1. ed. São Paulo, 1998.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SP (IPT). **Madeira para uso sustentável na construção civil.** Disponível em: <<http://www.ipt.br/publicacoes/3.htm>>. Acesso em: 23/03/2012.

IWAKIRI, S. **A influência das variáveis de processamento sobre propriedades de chapas de partículas de diferentes espécies de *Pinus*.** 130 f. Tese (Doutorado) - Setor de Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1989.

IWAKIRI, S. **Painéis de madeira reconstituída.** Curitiba: FUPEF, 2005.

IWAKIRI, S.; PRATA, J. G. **Utilização da madeira de *eucalyptus grandis* e *eucalyptus dunnii* na produção de painéis de cimento-madeira.** Disponível em: <<http://redalyc.uaemex.mx/pdf/744/74414109.pdf>>. Acesso em: 10/08/2008.

JORGE, F. C.; PEREIRA, C.; FERREIRA, M. F. Wood-cement composites: a review. **European Journal of wood and wood products.** Springer-Verlag, 2004.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. **Reciclagem de resíduos da construção.** Disponível em: <<http://www.reciclagem.pcc.usp.br/ftp/CETESB.pdf>>. Acesso em: 20/03/2012.

KLOCK, U. **Notas de Aula Química da Madeira.** Disponível em: <http://www.madeira.ufpr.br/ceim/index.php?option=com_content&view=article&id=42:quimica-da-madeira-&catid=18:quimica-da-madeira&Itemid=81>. Acesso em: 20/03/2012.

KUROKI, Y. **Manufacturing of light-weight cement-bonded particleboard in Japan.** Forest Products Society, 1998. Vol. III, p. 136-142.

LACERDA, F. S. de. **Resistência dos materiais.** 4. ed. Rio de Janeiro: Globo, 1964.

LAROCA, C. **Desenvolvimento de protótipo de habitação social em madeira de reflorestamento e avaliação do desempenho termo-acústico**. 313 f. Tese (Doutorado) - Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

LATORRACA, J. V. de F. **Eucalyptus spp na produção de painéis de cimento-madeira**. 191 f. Tese (Doutorado) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.

LATORRACA, J. V. de F.; IWAKIRI, S. Painéis de madeira-cimento. In: IWAKIRI, S. **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: FUPEF, 2005. p. 213-239.

LIMA, A. J. M. de. **Utilização de resíduo de *Pinus* spp e materiais cimentícios alternativos na produção de blocos para alvenaria estrutural**. 281f. Tese (Doutorado) - Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

LIMA, I. S. **Qualidade de vida no trabalho nas construções de edificações: a percepção dos operários das empresas de pequeno porte**. 234 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós Graduação em Engenharia da Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1995.

LUDWIG, F. *et al*. **Caracterização química de substratos formulados com casca de *Pinus* e terra vermelha**. In: VI ENCONTRO NACIONAL SOBRE SUBSTRATOS PARA PLANTAS MATERIAIS REGIONAIS COMO SUBSTRATO, 2008, Fortaleza. Disponível em: <http://www.cnpat.embrapa.br/viensub/Trab_PDF/sub_3.pdf>. Acesso em: 12/08/2012.

MALONEY, T. M. **Modern particleboard e dry-process fiberboard manufacturing**. Califórnia: Book Division, 1993.

MANUAL TÉCNICO DE ALVENARIA – Projeto /PW - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CONSTRUÇÃO INDUSTRIALIZADA. São Paulo, 1990.

MATOS, J. L. M. de. **Estudos sobre a produção de painéis estruturais de laminas paralelas de *Pinus taeda* L.** 117 f. Tese (Doutorado) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1997.

MATOSKI, A. **Utilização de pó de madeira com granulometria controlada na produção de painéis de cimento-madeira**. 202 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2008.

MESEGUER, A. G. **Controle e garantia da qualidade na construção**. Tradução de: BAUER, R. J. F.; CARMONA FILHO A.; HELENE, P. R. L. São Paulo: Co-edição: Sinduscon – SP/Projeto/PW, 1991.

MOLESMI, A. A. Emerging technologies in mineral-bonded wood and fiber composites. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE PRODUTOS SÓLIDOS DE MADEIRA DE ALTA TECNOLOGIA, 1., 1998, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: UFMG, 1998. p. 144-156.

MOLESMI, A. A. **Particleboard**. Londres e Amsterdam: Southern Illinois University Press, v.1 e v.2, 1974.

MOLESMI, A. A.; GARCIA, J. F.; HOSFSTRAND, A. D. Effect of various treatments and additives on wood-portland cementwater systems. **Wood and Fiber Science**, Amsterdam, 1983, v. 15, n. 2, p. 164-176.

NEUFERT, A. **Arte de projetar em arquitetura**. 4. ed. Barcelona: Gustavo Gili, 1974.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997.

NISGOSKI, S. **Espectroscopia no infravermelho próximo no estudo de características da madeira e papel de *Pinus taeda* L.** 160 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

PEDROSA, A. de L. **Desempenho estrutural de vigas "I" constituídas por PLP e compensado de *Pinus taeda* L. E *Eucalyptus dunnii* Maiden e OSB de *Pinus spp.*** 104 f. Dissertação (Mestrado) - Setor de Ciências Agrárias, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

PFEIL, W.; PFEIL, M. S. **Estruturas de madeira**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

PIMENTEL, L. L. **Telhas onduladas a base de cimento portland e resíduos de *Pinus caribea***. Disponível em: <<http://scholar.google.com/scholar?q=compositos,fibra+vegetais,+aglomerantes&hl=ptBR&lr=&start=10&sa=N>>. Acesso em: 28/08/2008.

PRATA, J. G. **Estudo da viabilidade tecnológica do uso de espécies de *Pinus* tropicais para produção de painéis colados lateralmente (Edge Glued Panels - EGP)**. 114f. Tese (doutorado) - Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

RICHTER, H. G.; BURGUER, L. M. **Anatomia da madeira**. 2.ed. Curitiba: Setor de Ciências Agrárias, UFPR, 1978.

SAVASTANO JUNIOR, H. **Materiais à base de cimento reforçados com fibra vegetal: reciclagem de resíduos para a construção de baixo custo**. Disponível em: <<http://aci-ar.gov.au/files/node/325/chapter1.pdf>>. Acesso em: 30/08/2011.

SCHMID, A. L. **A idéia de conforto: reflexões sobre o ambiente construído**. Curitiba: Pacto Ambiental, 2005.

SEMPLE, K. E.; EVANS, P. D. **Wood-cement composites—Suitability of Western Australian mallee eucalypt, blue gum and melaleucas.** Disponível em: <<https://rirdc.infoservices.com.au/downloads/04-102.pdf>>. Acesso em: 30/08/2011.

SHIMOYAMA, V. R. de S. **Estimativas de propriedades da madeira de *Pinus taeda* através do método não destrutivo emissão de ondas de tensão, visando a geração de produtos de alto valor agregado.** 151 f. Tese (Doutorado) - Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

SILVA, G. C. *et al.* Efeito de aditivos minerais sobre as propriedades de chapas cimento-madeira. **Árvore**, Viçosa, v. 39, n. 3, p. 451- 456, 2006.

SIMATUPANG, M. H.; GEIMER, R. L. **Inorganic binder for wood compositers: feasibility and limitations.** Disponível em: <<http://128.104.77.228/documnts/pdf1990/simat90a.pdf>>. Acesso em: 8/08/2011.

SIMATUPANG, M. H. *et al.* **Technologies for rapid production of mineral-bonded wood composite boards.** Disponível em: <<http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf1991/simat91a.pdf>>. Acesso em: 30/08/2011.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). **Relatório anual de 2010a.** Disponível em: <http://www.snic.org.br/pdf/snic-relatorio2010-11_web.pdf>. Acesso em: 08/08/2011.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). **Relatório anual de 2010b.** Disponível em: <http://www.snic.org.br/pdf/Historia_do_Cimento_no_Brasil.pdf>. Acesso em: 08/08/2011.

SJOSTROM, E. **Wood chemistry: fundamentals and applications.** 2th. ed. San Diego, CN: Academic Press, 1993.

SOUZA, R.; MEKBEKIAN, G. **Qualidade na Aquisição de Materiais e Execução de Obras.** São Paulo, Ed. Pini, 1996.

SOUZA, R. **Tendências na construção.** Disponível em: <http://www.cte.com.br/site/artigos_tecnologia_ler.php?id_artigo=1697>. Acesso em: 28/05/2011.

SZÜCS, C. A. A madeira e as construções dos próximos seis anos. **Revista da Madeira.** Disponível em: <[http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1452&subject=Construção Civil&title=A madeira e as construções dos próximos seis anos](http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1452&subject=Construção%20Civil&title=A%20madeira%20e%20as%20construções%20dos%20próximos%20seis%20anos)>. Acesso em: 09/09/2010.

TAPPI – Testing Procedures of Technical Association of Pulp and Paper Industry. **TAPPI 252 OM:** pH and electrical conductivity of hot water extracts of pulp, paper and paperboard. 2002. Disponível em: <<http://www.tappi.org/.../pH-and-Electrical-Conductivit.>>. Acesso em: 10/12/2011.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. Londres, 1990.

TCPO 10: **Tabela de composições de preços para orçamentos**. São Paulo: Pini, 1996.

THOMAZ, E. Patologias. In: **Manual técnico de alvenaria – projeto /PW**. Associação Brasileira de Construção Industrializada. São Paulo, 1992.

TRIANOSKI, R. **Avaliação do potencial de espécies florestais alternativas, de rápido crescimento, para produção de painéis de madeira aglomerada**. 2010. 260 f. Dissertação (mestrado) Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1884/24136>>. Acesso em: 07/07/2012.

TSYPIN, J. Characteristics of production and application of cement-bonded particleboard in the Soviet Union. In: **Inorganic Bonded Wood and Fiber Composite Materials**. USA, v.1., p. 55-57, 1998.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. **Gestão do entulho em canteiro de obra**. São Paulo, 1998. Disponível em: <www.reciclagem.pcc.usp.br>. Acesso em: 21/07/2008.

VILLACIS, L. G. T. **Um estudo sobre tratamentos anti-inflamatórios na fabricação de chapas de aglomerados no Brasil**. 1978. 131 f. Dissertação (Mestrado) Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Universidade Federal do Paraná.

WASTOWSKI, A. D. **Química da Madeira**. Disponível em: <<http://www.cesnors.ufsm.br/professores/arci/efl2042-quimica-da-madeira-engenharia-florestal/>>. Acesso em: 20/03/2012.

WOLFE, R.; GJINOLLI, A. E. **Assessment of Cement-Bonded Wood Composites as Means of Using Low-Valued Wood for Engineered Applications**. Disponível em: <<http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf1996/wolfe96b.pdf>>. Acesso em: 8/06/2011.

YOUNGQUIST, J. A. **Wood-based composites and panel products**. 1999. Disponível em: <<http://www.cedengineering.com/upload/Woodbased%20Composites%20and%20Panel%20Products.pdf>>. Acesso em: 10/02/2010

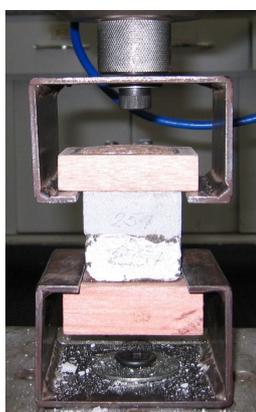
ESTUDOS COMPLEMENTARES

| | |
|---|-----|
| APÊNDICE 1 - ENSAIO DE ADERÊNCIA AO REVESTIMENTO | 167 |
| APÊNDICE 2 - ENSAIO DE EXPOSIÇÃO AO FOGO | 169 |
| APÊNDICE 3 - AVALIAÇÃO EXPEDITA DO CUSTO DO COMPÓSITO | 171 |

APÊNDICE 1

ENSAIO DE ADERÊNCIA AO REVESTIMENTO

Durante a realização do ensaio de aderência interna foi aproveitado a superfície dos corpos de prova para aplicação de uma camada de revestimento de argamassa com componentes minerais tradicionais, areia, cal e cimento sem a ponte de ligação conhecida como chapisco (Figura 25).



(A)



(B)

FIGURA 25 - ENSAIO DE TRAÇÃO PERPENDICULAR À SUPERFÍCIE ADAPTADO À ADERÊNCIA AO REVESTIMENTO.

(A) DISPOSITIVO PARA TRAÇÃO PERPENDICULAR À SUPERFÍCIE

(B) IMAGENS DO PLANO DE FALHA DEVIDO AO ENSAIO DE ADERÊNCIA AO REVESTIMENTO

A expectativa de ruptura na interface era esperada. Porém, caso ocorresse a princípio a ruptura no interior do compósito, os corpos de provas estariam comprometidos para a continuação do ensaio de aderência à superfície e os resultados que se apresentassem seriam considerados para a primeira ruptura ocorrida. Entretanto, em todos os 32 corpos de prova aconteceram preliminarmente a ruptura na interface entre o compósito e o revestimento aplicado (Figura 25) e os respectivos resultados acompanhados da análise estatística estão apresentados na Tabela 17, a seguir.

TABELA 17 - MÉDIA DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO PERPENDICULAR ÀS SUPERFÍCIES PARA VERIFICAÇÃO DO ARRANCAMENTO DO REVESTIMENTO

| Tratamento | Cimento C1 | | Cimento C2 | |
|------------------------------|------------------------------|--------|------------------------------|--------|
| | Média (kgf/cm ²) | CV (%) | Média (kgf/cm ²) | CV (%) |
| g1 | 0,85 B | 29,51 | 0,46 AB | 51,89 |
| g2 | 0,64 AB | 36,84 | 0,79 B | 34,06 |
| t1 | 0,62 AB | 36,46 | 0,27 A | 60,61 |
| t2 | 0,24 A | 46,47 | 0,20 A | 28,83 |
| Média (kgf/cm ²) | 0,59 | | 0,45 | |
| p | 0,013* | | 0,0060** | |

FONTE: O autor (2012)

NOTA: Médias seguidas pela mesma letra maiúsculas nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

* significativo ao nível de 95% de probabilidade

** significativo ao nível de 99% de probabilidade

APÊNDICE 2

ENSAIO DE EXPOSIÇÃO AO FOGO

A realização do ensaio de exposição ao fogo do compósito madeira cimento foi realizado com as informações provenientes do trabalho de Villacis (1978) que estudou o efeito da aplicação de diferentes retardantes químicos em diferentes concentrações, aplicadas às partículas de madeira em chapas de aglomerado produzidas no laboratório da UFPR, empregando a norma DIN 53438 F. O aparato por essa norma recomendado para o ensaio de inflamabilidade conforme Figura 26 (A) foi desenvolvido para a pesquisa de Villacis (1978) e encontrava-se no Laboratório de Produção de Painéis da UFPR.



(A)



(B)



(C)



(D)

FIGURA 26 - ENSAIO DE INFLAMABILIDADE DO COMPÓSITO MADEIRA CIMENTO
FONTE: O autor (2012)

Na Figura 26 (B) observa-se o termômetro indicando a leitura da temperatura de 449°C captada na superfície do corpo de prova. Conforme a recomendação da norma DIN 53438 F, ao se interromper a chama do bico de Bunsen, depois de noventa segundos de exposição ao fogo dever-se-ia cronometrar a duração da chama gerada no corpo de prova. Para o compósito de madeira cimento em teste, não houve propagação e nem permanência da chama quando cessada a fonte de calor, Figura 26 (C).

A imagem da Figura 26 (D) apresenta o corpo de prova enquanto submetido à ação da chama, quando estendido o ensaio, por sessenta minutos. Entretanto, o lado oposto da fonte de calor em contato da mão, embora a espessura do painel madeira cimento medindo vinte e cinco milímetros, foi possível suportar o calor, pois apresentava-se essa face do painel com 45°C de temperatura ao final de uma hora e noventa segundos de exposição ao fogo.

APÊNDICE 3

AVALIAÇÃO EXPEDITA DO CUSTO DO COMPÓSITO

O custo relativo do compósito madeira cimento estudado, apresentado no Quadro 32 está relacionado e indexado ao preço do dia e ao consumo do cimento, na proporção de trezentos e cinquenta quilogramas por metro cúbico de compósito produzido. Os índices para o cálculo de custos, para o consumo dos materiais e calculo do tempo de utilização da mão de obra para elaboração desses custos relativos estão de acordo com a (TCPO 10; 1996).

Os encargos sociais e tributários decorrentes do trabalho, INSS, FGTS, PIS/PASEP, Sistema S e mais os encargos trabalhistas, décimo terceiro salário, adicional de férias, férias, repouso remunerado, salário família, vale transporte foram contabilizados em cento e trinta por cento sobre o salário médio recebido pela classe trabalhadora nessa área de atividade.

O Quadro 32 apresenta uma comparação entre os custos relativos do compósito madeira cimento e outro compósito convencional de argamassa de cimento e areia de origem mineral usado na construção civil

| | COMPÓSITO MADEIRA CIMENTO | COMPÓSITO ARGAMASSA DE CIMENTO E AREIA DE ORIGEM MINERAL |
|--------------------------------|----------------------------------|---|
| Aglomerantes | 1,050 | 1,000 |
| Agregados | 0,196 | 0,430 |
| Mão de obra + encargos sociais | 0,275 | 0,275 |
| Equipamentos | 0,143 | 0,143 |
| Custo | 1,664 | 1,848 |

QUADRO 32 - RELAÇÃO ENTRE OS CUSTOS DO COMPÓSITO MADEIRA CIMENTO E O COMPÓSITO ARGAMASSA DE CIMENTO E AREIA MINERAL

FONTE: O autor (2012)

Tendo em vista que a operação e a produção de ambos compósitos contam com a necessidade dos mesmos equipamentos e a mesma classe profissional de trabalhadores. O Quadro 32 mostra a diferença de 2,19 vezes entre os custos dos agregados de origem vegetal e os agregados de origem mineral. O custo final do compósito com agregados vegetais foi 11,05% menor quando comparado com o compósito argamassa de cimento e areia de origem mineral.