

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

DESEMPENHO TÉRMICO, ACÚSTICO E MECÂNICO DE COMPÓSITOS  
CIMENTÍCIOS PRODUZIDOS COM RESÍDUOS DA INDÚSTRIA  
MADEIREIRA DE PORTO VELHO

UMBERTO GONÇALVES RIBEIRO

MANAUS  
2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

UMBERTO GONÇALVES RIBEIRO

DESEMPENHO TÉRMICO, ACÚSTICO E MECÂNICO DE COMPÓSITOS  
CIMENTÍCIOS PRODUZIDOS COM RESÍDUOS DA INDÚSTRIA  
MADEIREIRA DE PORTO VELHO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Raimundo Pereira de Vasconcelos

MANAUS  
2016

### Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

R484d Ribeiro, Umberto Gonçalves  
Desempenho térmico, acústico e mecânico de compósitos cimentícios produzidos com resíduos da indústria madeireira de Porto Velho / Umberto Gonçalves Ribeiro. 2016  
76 f.: il.; 31 cm.

Orientador: Raimundo Pereira de Vasconcelos  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Amazonas.

1. Materiais alternativos. 2. Desempenho térmico. 3. Desempenho acústico. 4. Cimento-madeira. I. Vasconcelos, Raimundo Pereira de II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

# DESEMPENHO TÉRMICO, ACÚSTICO E MECÂNICO DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS PRODUZIDOS COM RESÍDUOS DA INDÚSTRIA MADEIREIRA DE PORTO VELHO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Civil da Universidade Federal do Amazonas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências de Engenharia Civil, área de concentração Materiais e Componentes de Construção.

Aprovada em 09 de maio de 2016.

## BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Raimundo Pereira de Vasconcelos (Orientador)  
Universidade Federal do Amazonas

Prof. Dr. Raimundo Kennedy Vieira  
Universidade Federal do Amazonas

Prof<sup>a</sup>. Dra. Valdete Santos de Araújo  
Universidade do Estado do Amazonas

## **DEDICATÓRIA**

Lembro saudosamente (*in Memoriam*) o professor Hércules Jesus de Carvalho Borges, que sempre motivou e facilitou o nosso ingresso no Programa, mas infelizmente não pôde compartilhar, agora, desta realização.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por me proporcionar viver e poder contribuir com o bem estar das pessoas agora e no futuro, através desta pesquisa.

À minha família, por acreditar em mim e me apoiar.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – UFAM e aos Técnicos Nilson e Jorge pelo apoio nos experimentos realizados.

À FARO, por disponibilizar sua estrutura e facilitar o desenvolvimento deste trabalho, através dos laboratórios e Técnicos.

Ao Professor Dr. Raimundo P. de Vasconcelos, por me supervisionar, dando-me total liberdade para experimentar verdadeiramente a pesquisa científica.

Aos demais professores do PPGEC-UFAM, por terem contribuído, cada um na área específica, para melhor execução desta pesquisa.

À Supermix Concreto S/A- Unidade Porto Velho, pelo auxílio em seus laboratórios, através do Eng. Civil Alexandre Einhardt e o Técnico Andrews Michel.

À Votorantim Cimentos S/A – Unidade Porto Velho, pelo auxílio em seus laboratórios de controle de qualidade, através do Químico Raphael Moraes e do Técnico Diego Arruda.

## Resumo

Os novos paradigmas em construções civis requerem aplicação de novas tecnologias em materiais alternativos, menos degradantes e com potencial reuso das matérias primas. Este trabalho buscou avaliar e estudar o desempenho de materiais não convencionais existentes em Porto Velho, na região Amazônica, procurando novas aplicações em materiais de construção. Durante as fases de coleta e análises das matérias primas procurou-se manter o foco na sustentabilidade, através da não degradação ambiental e no baixo consumo de energia. Assim, empenhou-se em realizar um trabalho dedicado às ações de reaproveitamento de recursos e materiais. Como ainda é muito presente a geração de matéria residual nas indústrias de beneficiamento de madeiras, procurou-se lançar mão desses recursos e, além de retirar do meio ambiente um material de descarte inadequado, foi sugerido uma destinação ecologicamente correta, na medida em que não aumenta a degradação nem o consumo de energia. A aplicação sugerida foi a de um material destinado ao isolamento térmico e acústico, mais precisamente, a produção de painéis cimentícios com adição de resíduos de madeiras, para revestimento de alvenarias. No estudo da compatibilização entre as matérias primas participantes foi necessário incluir na composição do aglomerante um teor baixo de  $\text{Ca(OH)}_2$  (cal hidratada) e metacaulinita Amazônica. Assim, foram produzidos corpos de prova em forma de painéis, os quais foram testados térmica e acusticamente, com a finalidade de se obter dados para avaliação do potencial de sua utilização. Adicionalmente, foram realizados os ensaios clássicos de resistência mecânica (compressão axial e tração na flexão) e avaliações físicas do compósito em estado endurecido, com a finalidade de subsidiar diagnósticos sobre os índices alcançados nos demais ensaios. Os resultados demonstraram a aplicabilidade na construção civil, com melhoria em massa específica reduzida em 19% em relação ao material convencional e redução da temperatura entre faces para 29,81%, enquanto a absorção sonora do compósito foi verificada em 49%.

**Palavras-chave:** Cimento-madeira, materiais alternativos, conforto térmico e acústico.

## **ABSTRACT**

*New paradigms in civil constructions require application of new technologies in alternative materials, less degrading and potential reuse of raw materials. This study aimed to evaluate and study the performance of unconventional materials existing in Porto Velho, in the Amazon region, looking for new applications in building materials. During the stages of collection and analysis of raw materials we tried to keep the focus on sustainability, through non-environmental degradation and low power consumption. So he undertook to carry out a dedicated work to resource reuse of actions and materials. Since it is still very present generation of residual matter in the wood processing industries, sought to make use of these resources and, in addition to removing environmental improper disposal of material, suggested an environmentally proper disposal, to the extent that no increases the degradation or power consumption. The suggested application was the material designed for thermal and acoustic insulation, more precisely, producing cementitious panels with addition of waste wood, masonry coating. In the study of compatibility between raw materials participants had to be included in the binder composition of a low content of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (slaked lime) and Amazon metakaolin. Thus, specimens were produced in the form of panels, which were tested thermally and acoustically in order to obtain data for assessing the potential for their use. In addition, the classic mechanical strength tests were performed (axial compression and tension in flexion) and physical composite ratings in the hardened state, in order to subsidize diagnoses on the rates achieved in other trials. The results demonstrated the applicability in construction, with an improvement in density reduced by 19% compared to conventional materials and temperature reduction by 32.3%, while the composite sound absorption was observed in 49%.*

**Keywords:** *Wood-Cement composite, alternative materials, thermal and acoustic comfort.*

*SUMÁRIO*

Abstract.....	viii
Sumário.....	ix
Lista de Figuras .....	x
Lista de Tabelas .....	xi
Lista de símbolos e siglas .....	xii
1. Introdução.....	14
2. Materiais e Métodos .....	16
3. Artigo 1 .....	19
4. Artigo 2 .....	50
5. Conclusões .....	73
6. referências .....	75

**LISTA DE FIGURAS**  
**ARTIGO 1**

Figura 1. Localização da coleta do agregado miúdo e dos resíduos.	16
Figura 2. Resíduos mistos coletados.	24
Figura 3. Metodologia básica dos ensaios.	27
Figura 4. Dispositivo construído para os ensaios de desempenho térmico.	31
Figura 5. Montagem das lâmpadas (esq.) e medição da temperatura externa (dir.).	31
Figura 6. Corpos de prova preparados para ensaio de resistência à compressão.	33
Figura 7. Corpos de prova para ensaio de resistência à tração na flexão (Esq.) e preparação do dispositivo para ensaio (Dir.).	34
Figura 8. Granulometria da areia, com referência às zonas ótimas e utilizáveis padronizadas (NBR 7217:1987 e NBR 7211:2009).	38
Figura 9. Consumo de cimento para os traços analisados.	39
Figura 10. Painéis produzidos sem adição da metacaulinita e $\text{Ca(OH)}_2$ : sem ganho de resistência até 3 dias.	40
Figura 11. Variação da temperatura ( $\Delta t$ ) entre faces do dispositivo em relação ao teor de vazios.	43

**ARTIGO 2**

Figura 1. Metodologia básica dos ensaios..	55
Figura 2. Dispositivo destinado aos ensaios de desempenho acústico.	56
Figura 3. Configuração esquemática do dispositivo para o método <i>in situ</i> , considerando o ângulo de incidência perpendicular à amostra	58
Figura 4. Forma de onda de excitação gerada pelo Audacity®	62
Figura 5. Configuração após montagem dos painéis, microfone e fonte	63
Figura 6. Interface analógico/digital (a) e microfone, utilizados nos ensaios de reflexão $W_r$ (b) e incidência direta de campo-livre $W_i$ (c).	64
Figura 7. Análise de espectro de frequência para T4, mostrando a magnitude de atenuação do sinal de estímulo.	66
Figura 8. Sobreposição entre o componente direto de campo-livre $W'_i$ e os ruídos de fundo.	68
Figura 9. Evolução da absorção sonora com relação ao volume de vazios nos compósitos da série “T” (frequências de 1600-3150 Hz).	69

## *LISTA DE TABELAS*

### ARTIGO 1

Tabela 1. Definição dos traços para a produção dos compósitos. ....	28
Tabela 3. Composição química do CP IV-32 analisado. ....	37
Tabela 4. Granulometria e umidade dos resíduos (NBR 7217:1987 e NBR 7211:2009). .....	38
Tabela 5. Massas específicas ( $\rho$ ) dos materiais selecionados. ....	39
Tabela 6. Características físicas dos compósitos endurecidos, determinados por imersão em água (médias). ....	41
Tabela 7. Temperaturas médias nos painéis, no intervalo de 0 a 30 min $\pm$ desvio padrão por amostragem. ....	42
Tabela 8. Resultados dos ensaios de resistência à compressão. ....	44
Tabela 9. Valores de MOR e MOE para ensaio de tração na flexão a 4 pontos. ....	44

### ARTIGO 2

Tabela 1. Definição dos traços para a produção do compósito cimento-madeira. ....	55
Tabela 2. Características físicas dos compósitos endurecidos, determinados por imersão em água (médias). ....	55
Tabela 3. Percursos de interesse para os ensaios acústicos. ....	60
Tabela 4. Características do sistema de processamento dos sinais. ....	64
Tabela 5. Média do nível de pressão sonora refletida nos painéis estudados. ....	66
Tabela 6. Coeficientes de absorção sonora ( $\alpha$ ) para os painéis T1 a T4, em frequências de bandas de 1/3 de oitava, acima de 1250 Hz. ....	66
Tabela 7. Coeficiente de absorção sonora para os painéis T1 e T4 reduzindo-se os ruídos de fundo e reverberações residuais. ....	68

**LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS**

$\alpha_i$  – Coeficiente de absorção sonora.

$\beta$  – Resultado do cancelamento (eliminação) do componente direto  $W_i$ .

$\Delta NPS$  – Diferença do Nível de Pressão Sonora, em uma operação de subtração entre dois níveis de pressão sonora (dB).

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

AM – Amazonas, Brasil.

CP – Cimento Portland.

DMC – Dimensão Máxima Característica.

DNER-ME – Órgão criador de Normas Rodoviárias.

FARO – Faculdade de Rondônia.

$f_{min}$  – Limite mínimo para análise de espectro de frequências (Hz).

$H, h$  – Distâncias do autofalante e do microfone, respectivamente, para a superfície sob testes.

MOE – Módulo de elasticidade.

MOR – Módulo de Ruptura.

ms – milissegundos

NBR – Norma Brasileira.

NBR NM – Norma Brasileira Mercosul.

$NPS_1$  – Nível de Pressão Sonora.

$NPS_2$  – Nível de Pressão Sonora.

$NPS_T$  – Nível de Pressão Sonora Total.

PVC – Policloreto de vinila, plástico.

PPGEC – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil.

$r$  – Raio da superfície ativa.

RO – Rondônia, Brasil.

SNR – *Sound to Noise Ratio*, Relação Sinal/Ruído.

T1, T2, T3, T4, T5 – Traços para produção de painéis cimento-madeira com 0%, 2,5%, 5,0%, 7,5% de resíduos e somente com substituição do aglomerante, respectivamente.

$T_w$  – *Time-window*, tamanho da janela temporal de análise de dados (segundos ou milissegundos).

UFAM – Universidade Federal do Amazonas.

$W'_i$  – Potência sonora de incidência direta de campo-livre (*free-field*).

$W_i$  – Potência sonora incidente direta (dB).

$W_p$  – Potência sonora dos sinais “parasitas”.

$W_r$  – Potência sonora refletida (dB).

## ***1. INTRODUÇÃO***

Com o consumo cada vez maior dos recursos naturais, as buscas por materiais alternativos estão mais presentes nos centros de pesquisa. Isso remete ao apelo da sustentabilidade, na medida em que as soluções de readequação no consumo das matérias primas reduzam aqueles processos produtivos que não estejam de acordo com seus princípios fundamentais. Por isso também, as novas pesquisas devem encaminhar-se para as soluções em materiais sustentáveis e de baixo consumo de energia.

Na indústria da construção civil, sobretudo nas áreas urbanas, nas edificações industriais, comerciais ou residenciais, há uma permanente busca pelo maior conforto humano, nos seus locais de trabalho ou de moradia, com especial atenção aos desempenhos térmico e acústico. Já no início, engenheiros e arquitetos mantêm o foco dos projetos no aparato tecnológico disponível, procurando por soluções que viabilizem o bem estar das pessoas, com rápida execução, baixo custo, eficiência, qualidade e disponibilidade regional (RIBAS, 2013). E, procurando estabelecer critérios para o desempenho dos sistemas de vedações verticais e o isolamento interno e externo, a NBR 15575:2013 da ABNT estabelece tratamento específico.

O estudo de novos materiais para a indústria da construção civil tem possibilitado, não a substituição total dos convencionalmente praticados, mas a redução da sua aplicação, através da adição de partes de outros materiais, mais adequados e menos agressivos, do ponto de vista da sustentabilidade. Ao utilizar esses compósitos se lançam mãos às mais relevantes propriedades dos materiais em particular, para benefício do produto final.

Como exemplo, podemos citar o trabalho de Medina (2011), onde este estudou a atividade pozolânica de materiais alternativos, como o metacaulim e o hidróxido de cálcio, interagindo entre si, e dando ao produto final um ganho significativo de desempenho, quando comparado com o produto convencional. Outro estudo, com a substituição parcial do agregado miúdo convencional por agregados de origem madeireira em diferentes percentuais,

mostrou a sua viabilidade na construção de edifícios. Esta substituição reduziu em até 50% a utilização do agregado mineral, sem prejuízo da função estrutural dos elementos construtivos e ainda proporcionando melhorias no isolamento térmico (LIMA, 2014).

A evolução das pesquisas na utilização das fibras vegetais e também dos diversos produtos madeireiros na produção de materiais compósitos, permite então avaliar outra vertente, quanto aos resíduos de madeiras produzidas na região Amazônica, especificamente nos entornos de Porto Velho, onde ficou comprovado a existência de geração de resíduos da ordem de mais de 50%, no beneficiamento de madeiras em toros (MARCHESAN, 2012). Ficou demonstrado que parte dos resíduos são destinados à queima para produção de energia, mas ainda existe o descarte inadequado, fato também constatado no presente trabalho.

Uma vez que a indústria de beneficiamento de madeiras ainda gera resíduos significativos, trata-se então de selecioná-los e avaliar o potencial de utilização na própria construção civil. Neste aspecto, as aplicações mais recomendadas são aquelas voltadas para a melhoria do conforto térmico e acústico (FAN *et al*, 2012), já que os compósitos lignocelulósicos podem fornecer melhores resultados, quando comparados, por exemplo, às aplicações que utilizam compósitos à base de resinas sintéticas (CABRAL *et al*, 2015).

Os estudos desenvolvidos ficaram então estruturados em dois artigos, incluídos neste trabalho nos Capítulos 3 e 4, os quais sucedem a uma descrição breve dos materiais e métodos (Capítulo 2), a qual é complementada nos próprios artigos. Ao final, nas conclusões (Capítulo 5) estão as impressões e resultados acerca dos achados na pesquisa, bem como os tópicos que deixaram de ser abordados, mas que podem, no futuro, compor novas pesquisas relacionadas aos assuntos aqui tratados.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados, de forma resumida, os materiais e os procedimentos empregados nesta pesquisa; mais detalhes, os resultados e a discussão serão apresentados nos artigos 1 e 2, os quais estão incluídos nos capítulos 3 e 4.

### 2.1. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Para desenvolvimento da pesquisa foram selecionadas matérias primas, dentro do escopo dos materiais regionais e não convencionais, tendo como foco a sustentabilidade, evitando-se o consumo adicional de energia para sua extração ou produção.

Dentre os materiais utilizados, tanto para a produção do compósito como para a montagem dos dispositivos de ensaios, podemos elencar:

1. Areia natural de rio, coletada no Areal Areia Branca, nas confluências dos Rio das Garças e Rio Candeias, nos limites territoriais dos municípios de Porto Velho e Candeias do Jamary, no Estado de Rondônia (Figura 1);

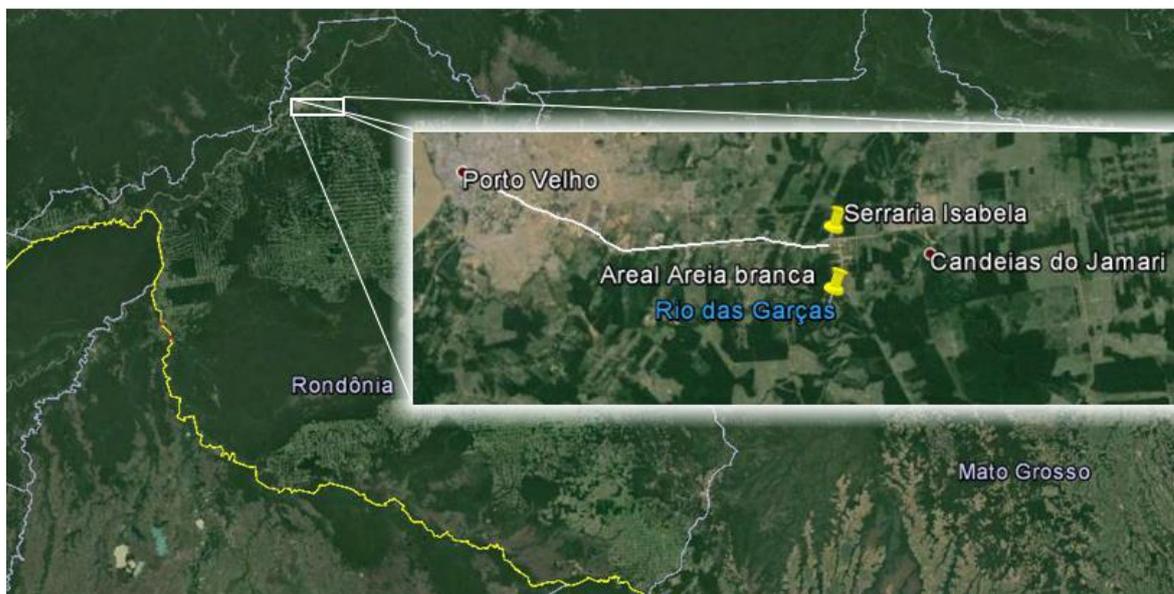


Figura 1. Localização da coleta do agregado miúdo e dos resíduos.

Fonte: Montagem a partir das imagens do Google Earth.

2. Os resíduos de madeiras foram coletados na Empresa Serraria Isabela, beneficiadora de madeiras em toros, localizada na zona rural, próximo ao município de Candeias do Jamary-RO;

3. O hidróxido de cálcio foi adquirido no comércio de Porto Velho-RO e a metacaulinita foi produzida nos laboratórios da UFAM, a partir da argila encontrada no município de Itacoatiara-AM;
4. O cimento Portland foi produzido na Unidade Porto Velho da Votorantim Cimentos S/A, e adquirido no comércio local;
5. Os resíduos de madeiras foram coletados em uma Empresa beneficiadora de madeiras em toros, localizada na zona rural, próximo ao município de Candeias do Jamary-RO;
6. O dispositivo para ensaios térmicos foi construído com madeiras de segundo uso, revestido com manta isolante feita com reaproveitamento de embalagens do tipo Tetrapack;
7. O dispositivo para ensaios acústicos foi montado também com madeiras de segundo uso, e está esquematizado no artigo 2.
8. Interface de áudio digital, microfone e computador, para aquisição e processamento dos sinais de áudio.

## 2.2. MÉTODOS

Para o desenvolvimento deste trabalho foram produzidos corpos de prova em formatos de cilindros (compressão e caracterização física), chapas (flexão a quatro pontos) e painéis (desempenho térmico e acústico). Para a produção do compósito foi necessário, antes de tudo, o estabelecimento de traços para estudo das propriedades pretendidas. Assim, foram tomados como parâmetro os resultados em pesquisas anteriores.

Para a composição da matriz aglomerante de cimento Portland com adição dos resíduos foi necessário a substituição parcial do cimento por Metacaulinita (10%) e hidróxido de cálcio  $\text{Ca(OH)}_2$  (5%). Esta substituição compensou os efeitos negativos do componente lignocelulósico sobre o cimento, além de possibilitar redução no consumo deste. O consumo do agregado miúdo na argamassa também foi reduzido pela substituição de frações de 2,5%

até 7,5% da sua massa pelos referidos resíduos. Foi estabelecido neste estudo um fator água/cimento de 0,40, conforme relatado na literatura (FAN, 2012), fazendo-se correções de trabalhabilidade com aditivo plastificante específico em teor de 1% da massa do cimento.

Os ensaios para o desempenho térmico foram desenvolvidos através de uma caixa de retenção de calor confeccionada em madeira e revestida com material termorefletor tipo Tetrapack, com a finalidade de evitar a dissipação de calor, e montada com painéis produzidos com as misturas, sendo aferidas as temperaturas interna e externa simultaneamente, durante 30 min, obtendo-se uma média de quatro medições laterais.

Os ensaios de caracterização dos compósitos, resistência à compressão e tração por flexão foram desenvolvidos com os corpos de prova moldados conforme as normas pertinentes e, sempre que possível, evitando a destruição dos espécimes, visando sua reutilização em outras avaliações, possibilitando maior fidelidade aos dados coletados.

Os ensaios de desempenho acústico sobre os painéis de cimento-madeira, produzidos nos traços citados, foi desenvolvido sobre um dispositivo montado com painéis medindo 0,50 x 0,50 m, para formar uma área útil de 1 m<sup>2</sup>, e assim estudar a influência dos resíduos adicionados, para posterior comparação com o desempenho do material convencional. O compósito foi submetido a testes através do método *in situ*, baseado nos estímulos impulsivos de uma fonte, incidente sobre o material em análise, captando-se as respectivas respostas impulsivas através de um microfone.

O processamento dos sinais utilizou técnicas estabelecidas na literatura para composição dos sinais incidentes e refletidos, sendo feitas as correções necessárias e a parametrização adequada para resultados válidos. Uma das técnicas utilizadas para separação dos componentes foi a Técnica da Subtração, baseada na distância temporal entre os sinais incidente e refletido. Também foram estrategicamente expurgadas aquelas faixas de frequências com maior carga de interferências, evitando discrepâncias nos resultados.

### **3. ARTIGO 1**

## **Desempenho térmico e mecânico de compósitos cimentícios produzidos com resíduos da indústria madeireira de Porto Velho**

**Umberto Gonçalves Ribeiro**

**Raimundo Pereira de Vasconcelos**

#### **Resumo**

Na região Norte do Brasil tradicionalmente ocorre a atividade da indústria extrativista madeireira. Em Porto Velho, Estado de Rondônia, foi registrada (2012) a geração de subprodutos em quantidade significativa. Então, o objetivo deste trabalho foi avaliar compósitos de matriz de cimento Portland com adição de resíduos da indústria de beneficiamento de madeira para aplicação na construção civil, como isolante térmico. A matriz de cimento Portland pozolânico foi melhorada substituindo-se parcialmente o cimento por Metacaulinita (10%) e hidróxido de cálcio  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (5%), favorecendo o controle da pega e a compatibilidade com o produto madeireiro. Os resíduos foram adicionados em teores de 2,5%, 5,0% e 7,5%, em substituição parcial do agregado miúdo, comparando-se com uma mistura padrão, sem resíduos. Os testes de desempenho térmico foram desenvolvidos por meio de uma caixa de retenção de calor montada com painéis produzidos com as misturas nos percentuais especificados, medindo-se as temperaturas interna e externa simultaneamente, durante 30 min. A caracterização dos compósitos, resistência à compressão e tração por flexão foram desenvolvidos para determinação do desempenho físico e mecânico dos compósitos. Os resultados mostraram redução em cerca de 32% na transmissão de calor entre as faces dos painéis, para 2,5% de adição de resíduos.

**Palavras-chave:** Materiais não convencionais. Compósito cimento-madeira. Resíduo de madeira. Isolamento térmico.

### ***Abstract***

*In northern Brazil traditionally occurs the wood extractive industry activity. In Porto Velho, State of Rondonia, was recorded (2012) the generation of by-products in significant amounts. So the aim of this study was to evaluate composite Portland cement matrix with addition of waste from the wood processing industry for application in construction, as thermal insulation. The Portland pozzolan cement matrix was improved partially replacing cement by metakaolin (10%) and calcium hydroxide Ca (OH) 2 (5%), favoring the handle control and compatibility with the timber product. The residues were added at ratio of 2.5%, 5.0% and 7.5% in partial replacement of fine aggregate, comparing it with a standard mix without waste. Thermal performance tests were developed through a heat-retaining box mounted to panels produced with the mixtures specified in percentage by measuring the internal and external temperatures simultaneously during 30 minutes. The characterization of the composite, compressive strength and tensile bending have been developed to check the physical and mechanical performance of composites. The results showed reduction of about 32% in the heat transmission between faces of the panels to 2.5% addition of waste.*

***Keywords:*** *Unconventional materials. Wood-cement composite. Waste wood. Thermal insulating.*

### **1. Introdução**

O paradigma do desenvolvimento sustentável tem provocado recorrentes estudos em termos de materiais alternativos para a indústria da construção civil. A indústria do cimento contribui com cerca de 5% das emissões mundiais de CO<sub>2</sub>, além de consumir elevada quantidade de energia no processo de fabricação, sendo imprescindível o desenvolvimento de alternativas para um processo de produção ecologicamente correto (KRIZOVA, 2012). Torna-

se necessário o desenvolvimento de novas tecnologias na adição de materiais e agregados que permitam um consumo otimizado do cimento e conseqüente redução no seu consumo (SOUZA *et al*, 2015).

O setor industrial de beneficiamento madeireiro na região de Porto Velho, RO, na Amazônia brasileira, mostrou uma geração de refugos de beneficiamento com média de 69,34%, para algumas espécies, sendo as destinações a esses refugos, principalmente, o desenvolvimento de painéis de madeira reconstituída ou queima direta para geração de energia. Mesmo assim, o desuso chega a 51 % (MARCHESAN, 2012).

Quanto ao aproveitamento desses resíduos para adição em compósitos cimentícios, pesquisas relatam a existência de inconsistências físicas e químicas na combinação dos materiais, apresentando alternativas com pré-tratamentos para os resíduos, visando melhorar a compatibilidade entre ambos. Algumas das principais desvantagens nessa junção são o aumento no tempo de pega do compósito e a redução na força de ligação entre as matérias-primas (NA *et al*, 2014; MACÊDO *et al*, 2012; KARADE *et al*, 2005).

As incompatibilidades genericamente estão estabelecidas entre dois mecanismos: primeiro, no princípio de que os extrativos compostos por vários componentes orgânicos presentes na madeira provocam um desequilíbrio químico na mistura ao reduzir a concentração dos íons  $\text{Ca}^{2+}$ , retardando o início da formação de compostos essenciais do compósito endurecido. Depois, pelo fato de que os compostos orgânicos formam uma fina camada na superfície dos grãos de cimento, tornando lento o processo de hidratação (NA *et al*, 2014).

Assim, várias técnicas são empregadas para melhorar o desempenho do compósito: lavagem dos resíduos em água fria e/ou quente, utilização de soluções de aditivos químicos aceleradores de pega, e até injeção de  $\text{CO}_2$ . O método de carbonatação da mistura promete, já nos primeiros minutos, uma aceleração na formação dos produtos da hidratação (carbonato de cálcio e silicato de cálcio), promovendo um rápido endurecimento da mistura (NA *et al*,

2014). Estudos que avaliaram a eficácia de tratamentos realizados com soluções de água,  $\text{CaCl}_2$  (cloreto de cálcio), MeOH (metanol) e  $\text{Ca(OH)}_2$  (hidróxido de cálcio), mostraram que o melhor desempenho foi obtido com este último (FAN, 2012).

Embora o emprego do  $\text{Ca(OH)}_2$  em testes de compatibilidade possa apresentar resultados divergentes, o composto, utilizado como pré-tratamento, foi o que apresentou melhores resultados de resistência à compressão axial nos compósitos cimento-madeira estudados por Castro *et al* (2014). Além disso, o emprego de aditivos, a adequação do fator água/cimento e a escolha do tipo certo de cimento melhoram significativamente a compatibilidade do compósito (TITTELEIN *et al*, 2012; MACEDO *et al*, 2011).

Procurando contornar o atraso na hidratação do cimento, Medina (2011) relata que a adição de metacaulim aos compósitos cimentícios provoca uma aceleração no processo de hidratação e favorece o efeito *filler*, ideais ao ganho de resistência no primeiro dia, e melhora o ganho de resistência pela atividade pozolânica do sétimo ao décimo quarto dia. Esta reação é potencializada pela adição de pequenas porções de  $\text{Ca(OH)}_2$ .

Por outro lado, resíduos lignocelulósicos adicionados a argamassas de cimento Portland provoca queda no desempenho mecânico à compressão, influenciado por fatores como tamanho da partícula, índice de vazios, taxa de absorção de água e densidade do compósito, entre outros. (RONQUIM, 2014).

Assim, a necessidade do desenvolvimento de materiais cimentícios de baixa densidade e um bom desempenho mecânico vai ao encontro do aproveitamento dos resíduos da indústria madeireira, levando-se em conta ainda, aspectos positivos como isolamento térmico e acústico, redução dos custos, impacto ambiental, resistência ao fogo, etc. (FADAI, 2012). Além disso, a fabricação de compósitos de cimento-madeira é um processo que não gera resíduos tóxicos, não requer pré-tratamentos de conservação e tem um baixo consumo de energia (LIMA *et al*, 2015).

A porosidade do produto madeireiro é um dos fatores que beneficiam as propriedades térmicas de placas de cimento-madeira, uma vez que estas possuem baixa condutividade térmica e podem contribuir para reduzir a transmissão de calor em paredes, chegando a ter condutividade térmica cerca de três vezes menor do que as fabricadas com gesso, por exemplo (TITTELEIN *et al*, 2012).

Este estudo procurou utilizar a matéria prima disponível regionalmente, realizando coletas dos insumos em fontes já corriqueiramente utilizadas, e os produtos industrializados foram, na sua maioria, de origem local, visando atender a um princípio de baixo custo.

Assim, buscou-se desenvolver um material compósito, com potencial utilização na construção civil, em aplicações de revestimento interno, com finalidades de melhoramento do desempenho térmico de edificações. A hipótese estabelecida foi que tal material viesse a reduzir, em determinado grau, a sensação térmica nos ambientes habitáveis.

## **2. Materiais e Métodos**

### **2.1 Caracterização dos Materiais**

#### ***Cimento Portland***

O cimento Portland escolhido foi o CP IV-32 (NBR 5736:1991), adquirido no comércio de Porto Velho, produzido na Empresa Votorantim Cimentos – Unidade Porto Velho.

Para a caracterização do cimento foi realizado o procedimento de peneiramento descrito na NBR 11579:1991, utilizando a peneira 75 µm, para que fosse possível determinar o módulo de finura (F) pela equação:

$$F = \frac{RC}{M} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

$F$  = Finura (%);

$R$  = Material retido, após procedimento (g);

$C$  = Fator de correção da peneira (valor entre 0,8 e 1,2);

$M$  = Massa inicial de cimento (g).

Quanto à determinação dos tempos de início e fim de pega foram feitos os procedimentos descritos na NBR NM 65:2002 da ABNT.

Para avaliação da composição química do cimento foi empregado o ensaio de fluorescência de raios-X, para tanto, foi empregado o equipamento Epsilon XL, marca Panalytical.

### ***Resíduos de Madeiras***

Os resíduos de madeira foram coletados na indústria de beneficiamento de madeira em toros, denominada Serraria Isabela (Candeias do Jamari – RO), a 18 km de Porto Velho (Latitude 8°48'9.64"S Longitude 63°44'24.97"O) e 4,5 km do município de Candeias do Jamary.

Durante a coleta constatou-se o acúmulo de resíduos há, aproximadamente, dois ou três dias, o que pressupõe nesse período o processamento de várias espécies florestais e, portanto, são resíduos mistos (Figura 2), sendo mais comuns as espécies cedro (*Cedrella SPP*), muiracatiara (*Astronium Lecoitei*) e cerejeira (*Amburana Cearensis*), conforme identificação pelo corpo técnico da empresa.

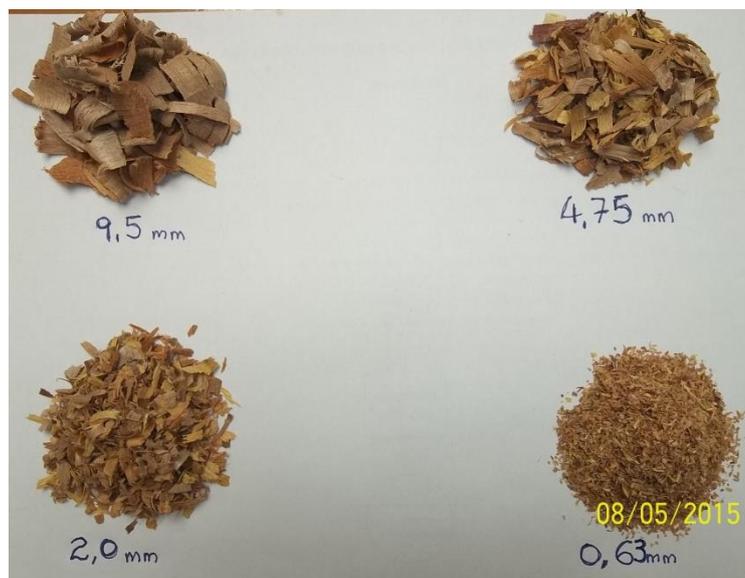


Figura 2. Resíduos mistos coletados.  
Fonte: imagem produzida pelo autor.

Após coletados, foram removidos manualmente os refugos diferentes de grânulos, lascas, pó e serragem em geral, pois assim poderiam ser submetidos à classificação através de peneiramento. Os resíduos foram deixados ao ar por 24h para eliminação da umidade superficial, em local coberto. Logo após, foram separados 15 kg desses resíduos e acondicionados em sacos plásticos, amarrados para que não voltassem a absorver umidade e encaminhado ao laboratório de solos da Faculdade de Rondônia – FARO para análise granulométrica (NBR 7217:1987 e NBR 7211:2009).

Devido ao fato de serem resíduos mistos, foram coletados também alguns refugos de maiores dimensões, com características físicas diferentes, formatos prismáticos, para posterior análise de densidade e umidade. A massa específica dos resíduos foi obtida a partir da determinação da densidade básica de três amostras de refugos sólidos submetidos ao procedimento padronizado (NBR 7190:1997).

#### ***Agregado miúdo***

O agregado miúdo selecionado para os ensaios foi coletado no areal Areia Branca, confluência dos Rio Candeias e Rio das Garças (Latitude 08°49'45.8"S Longitude 063°44'32.9"O), a 21 km de Porto Velho e 7,5 km de Candeias do Jamary.

Após a coleta o agregado foi acondicionado em baldes plásticos e fechados, para que fossem preservadas as condições em que foram encontrados.

O material foi coletado em quantidade de, aproximadamente, 60 kg, encaminhando-se cerca de 15 kg para o laboratório de solos da FARO – Faculdade de Rondônia, para análise granulométrica (NBR 7217:1987 e NBR 7211:2009).

Além da granulometria foram verificadas as características DMC (Dimensão Máxima Característica), módulo de finura e teor de umidade do agregado.

Para determinação da umidade foram feitos os procedimentos descritos na norma DNER-ME 080:1994 e calculada a umidade através da equação:

$$h = \frac{(P_h - P_s)}{P_s} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

$h$  = Umidade (%)

$P_h$  = Peso do material úmido (g)

$P_s$  = Peso do material seco (g)

### ***Metacaulinita, Hidróxido de Cálcio ( $Ca(OH)_2$ ) e Aditivo plastificante***

A metacaulinita utilizada neste estudo tem sua origem nos solos argilosos no município de Itacoatiara-AM, sendo produzida nos laboratórios da UFAM – Universidade Federal do Amazonas. Para tanto, o material argiloso passou pelos procedimentos de coleta, secagem (100°C/24 horas), destorroamento e moagem. Após a moagem, passou-se o material na peneira 0,075 mm (mesh 200) e levado ao forno mufla por 3h (750°C) (MARQUES, 2015).

O  $Ca(OH)_2$  foi adquirido no comércio de Porto Velho e submetido a análise de densidade pelo método descrito na NBR NM 23:2001.

O aditivo plastificante utilizado foi o MasterPolyheed® 30 produzido pela BASF S.A., fornecido pela Empresa Supermix – Unidade Porto Velho, sendo este utilizado para dar fluidez ao concreto produzido pela Empresa para lançamento por bombeamento.

## **2.2 Procedimentos experimentais**

Os testes sobre o material seguiram uma sequência de procedimentos conforme a Figura 3, iniciando com a aquisição das matérias primas, seguindo-se das análises físicas em laboratório, e depois, produzindo-se o compósito pretendido, conforme adequações especificadas. Então, confeccionou-se os corpos de prova, de acordo com as normas específicas, tanto na elaboração dos espécimes, quanto na execução dos respectivos ensaios.

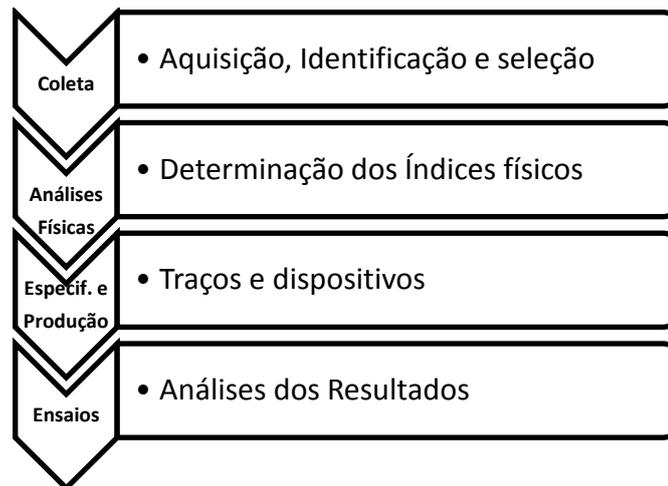


Figura 3. Metodologia básica dos ensaios.

### 2.2.1 Produção do compósito cimento-madeira

Considerando que não estava no escopo da pesquisa avaliar o desempenho do compósito, em razão da variação das dimensões das partículas, o compósito foi produzido selecionando-se o material passante na peneira 1,18 mm e retida na peneira 0,6 mm. Os resíduos abaixo de 0,6 mm foram eliminados como finos. Os resíduos utilizados foram imersos em água por 24 horas, para que adquirissem o estado saturado - superfície seca. Para isso foram deixados secar ao ar, por 3 horas, depois de retirados da água.

A areia foi peneirada e utilizada a fração passante na peneira 1,18 mm. Como a areia era lavada de rio foram utilizados também os finos abaixo do diâmetro selecionado, sem quaisquer tratamentos adicionais.

Uma vez que o fator água/cimento é um dos pontos críticos no desempenho dos compósitos cimento-madeira e, considerando o teor ótimo de água de amassamento para estes compósitos variando no intervalo de 0,30 a 0,45 (FAN, 2012), adotou-se neste estudo o índice de 0,40. Deve-se salientar que os índices próximos de 0,30 são considerados impraticáveis, pois a mistura fica muito seca e de difícil amassamento, conforme foi observado por testes realizados durante o desenvolvimento da pesquisa.

Para execução das misturas partiu-se de uma relação cimento-areia em 1:3 (NBR 7215:1996), para o traço T1, substituindo-se o agregado miúdo em frações percentuais,

relativas à sua massa, em 2,5%, 5,0% e 7,5% pelo resíduo de madeira. O teor de 0% serviu como referência para a determinação dos demais índices de substituição pelos resíduos. A Tabela 1 mostra a definição dos traços para a produção do compósito.

Tabela 1. Traços experimentais.

Traço	Teor [cimento:metacaulinita:cal]*:[areia:resíduo]**	Descrição	CP (kg/m <sup>3</sup> )
T1	[1:0:0]:[3:0]	Referência-1	534,13
T2	[0,85:0,1:0,05]:[2,925:0,075]	2,5% resíduo	504,95
T3	[0,85:0,1:0,05]:[2,850:0,150]	5,0% resíduo	485,53
T4	[0,85:0,1:0,05]:[2,775:0,225]	7,5% resíduo	463,35
T5	[0,85:0,1:0,05]:[3:0]	Referência-2	531,40

\*aglomerantes

\*\*agregados

A fração unitária de cimento, por sua vez foi reduzida substituindo-se 0,1 parte (10%) por metacaulinita e 0,05 parte (5%) por Ca(OH)<sub>2</sub> (cal hidratada).

Uma vez que a atividade pozolânica da metacaulinita está relacionada à superfície específica nas primeiras idades de hidratação do cimento e no ganho de resistência (MARQUES, 2015) e que nesta fase o resíduo madeireiro mostra sua incompatibilidade, optamos por adicionar 10% da metacaulinita e 5% de Ca(OH)<sub>2</sub>, em substituição a igual teor do cimento, visando potencializar o ganho de resistência nas idades iniciais.

O traço T5 foi desenvolvido para verificar a influência dos resíduos nos resultados de desempenho mecânico do compósito (resistência a compressão).

A trabalhabilidade da mistura foi melhorada com a adição do plastificante MasterPolyheed® 30 no teor de 1% relativo à massa do cimento, conforme indicação do fabricante.

### ***Produção dos painéis***

Para a produção dos painéis foi preparada uma forma metálica com capacidade de fabricação de 5 peças de cada vez, nas dimensões especificadas (500 x 500 x 15 mm), com o intuito de obter as 4 faces laterais da caixa para os ensaios térmicos, além de uma peça adicional como garantia contra quebras acidentais, e também para que todas os painéis, em

cada teor de resíduo, possuíssem as mesmas características em termos de produção (temperatura e umidade ambientais, idade, etc).

Foi produzida uma mistura para cada painel, com os seguintes quantitativos de materiais (para o traço T1): 2000g de cimento, 6000g de areia, 800g de água. Separou-se a areia peneirada, à qual foram adicionados os demais materiais na sequência: 50% do cimento → mistura até homogeneização → 50% da água → mistura até homogeneização → restante da areia e do cimento → mistura até homogeneização → restante da água → mistura até homogeneização. Estas quantidades foram computadas como suficientes para enchimento e moldagem de cada painel, sendo executada uma mistura manual para cada unidade. No traço T1 não foi adicionado o aditivo plastificante.

As quantidades de materiais dosadas para este procedimento serviram de base para moldagem dos demais painéis, com adição dos resíduos, adicionando-se 1% (20g, relativo à massa do cimento) do plastificante à segunda parte da água de amassamento.

A forma metálica foi previamente envolvida com fina camada de óleo mineral (visando facilitar a desmoldagem), colocada sobre um substrato plano, forrado com a embalagem de papel do cimento, o qual foi aspergido levemente com água (para evitar que viesse a absorver parte da água da mistura). Após completa homogeneização manual (cerca de 10 minutos) a mistura foi lançada e feita a compactação e nivelamento através de régua metálica.

A desmoldagem dos painéis foi feita após 24 horas com a remoção da forma metálica, efetuando-se algumas batidas levemente para facilitar o descolamento, e deixados por mais 48 horas até sua remoção do local. Nesse período e até que se completassem sete dias, os painéis, com e sem resíduos, foram umedecidos diariamente com água limpa para manter a cura úmida.

Os painéis foram armazenados adequadamente até que se completassem os 28 dias relativos ao processo de cura e endurecimento, antes de quaisquer testes de desempenho.

### 2.2.2 Desempenho térmico

O método de avaliação do desempenho térmico (taxa de absorção de calor) foi adaptado de Adriazola (2008), através da construção de um dispositivo composto por um conjunto de painéis, fechados em uma caixa formando um cubo (Figura 4). Embora no modelo de Adriazola os ensaios foram realizados em ambiente externo, neste estudo foram reduzidas pela metade as dimensões do dispositivo e realizados os ensaios em laboratório, com a fonte de calor inserida no interior da caixa, construída com o material em estudo.

A construção do dispositivo foi efetuada fazendo-se uma colagem dos painéis por suas arestas, conforme o teor dos resíduos adicionados, utilizando-se uma pasta cimentícia idêntica à matriz de cimentação dos painéis e encaixando-os na base e tampa do dispositivo.

A fonte calorífica inserida na caixa foi composta por duas lâmpadas mistas de mercúrio de alta pressão com potência total de 320 Watts. As características das lâmpadas estão descritas na Tabela 2.

Foram efetuadas medições de temperatura interna e externa, durante 30 min em intervalos de 6 min após iniciada a emissão de calor ou até que a temperatura na face interna da caixa alcançasse 80° C (temperatura limite para avaliação de sistemas de vedação verticais expostos a ação de calor – NBR 15575-4:2013).

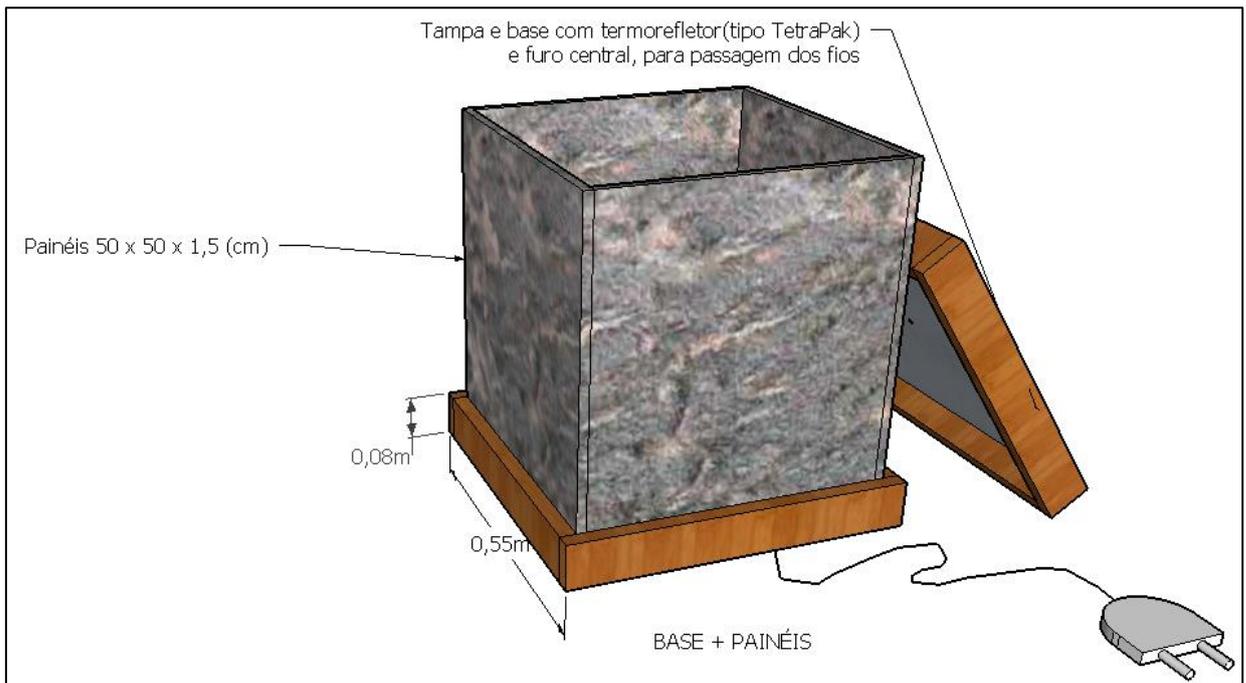


Figura 4. Dispositivo construído para os ensaios de desempenho térmico.  
Fonte: adaptação do dispositivo de Adriazola (2008).

Tabela 2. Características da fonte de calor.

Fluxo luminoso	3150 lm
Eficiência luminosa	20 lm/W
Temperatura da cor	3500 K
Vida mediana	10000 h
Temp. máxima da base	200 °C
Temp. máxima do Bulbo	350 °C

Antes de iniciada a emissão de calor foi aferida a temperatura ambiente para referência quanto ao desempenho do material, a qual estava em torno de 30 °C (Tabela 7).



Figura 5. Montagem das lâmpadas (esq.) e medição da temperatura externa (dir.).  
Fonte: imagem produzida pelo autor.

Para aferição da temperatura dos painéis foram utilizados dois termômetros: um deles tipo agulha, com precisão de 0,1 °C e capacidade de medição da temperatura do ambiente e de superfícies por contato até +230°C, e o outro do tipo pistola de infravermelho com mira a laser classe II, com capacidade de medição de superfícies sem contato, de -32 °C até +380 °C e resolução de 0,1 °C.

A leitura da temperatura interna foi efetuada através da verificação do painel indicador do termômetro agulha, inserido através do furo existente na tampa do dispositivo. A haste deste aparelho possui 127 mm de comprimento, o que permite o seu posicionamento bem próximo ao centro no espaço interno.

Simultaneamente à medição interna, foi executada em cada face externa, a verificação da temperatura, sendo processado o valor médio das 4 faces para cada painel, num total de 24 medições por tipo de painel (traço da série “T”). Após as medições, o dispositivo era desmontado e remontado com outro tipo de painel, para nova série de medições.

### **2.2.3 Desempenho mecânico**

Para a avaliação do desempenho mecânico do compósito foram desenvolvidos os ensaios de compressão axial de corpos de prova cilíndricos, para verificação da resistência a compressão, e flexão de corpos de prova prismáticos a quatro pontos, para verificação do módulo de ruptura (MOR) na tração por flexão e módulo de elasticidade (MOE).

Para a resistência a compressão foram moldados corpos de prova cilíndricos (NBR 5739:2007) com as composições dos traços T1 a T5, utilizando-se um conjunto de formas de PVC. Como estes moldes possuíam diâmetros internos menores cerca de 3 mm em relação ao recomendado pela norma brasileira (50 mm), as resistências alcançadas foram recalculadas para ajuste às dimensões cilíndricas de 100 mm x 47 mm, através da equação:

$$f_c = \frac{4 F}{\pi D^2} \quad (3)$$

Onde,

$f_c$  é a resistência à compressão (MPa);

$F$  é a força máxima alcançada (N);

$D$  é o diâmetro do corpo de prova (mm).

Para cada teor de resíduo madeireiro participante na mistura foram moldados 10 corpos de prova, perfazendo 40 amostras (Figura 6). Adicionalmente, mais um conjunto de 10 amostras (T5) foi moldado para verificação da influência do produto madeireiro na resistência à compressão e na massa específica do compósito, num total de 5 amostras com 10 corpos de prova.



Figura 6. Corpos de prova preparados para ensaio de resistência à compressão.  
Fonte: imagem produzida pelo autor.

Após a desmoldagem (24 horas) dos corpos de prova, estes foram armazenados e submetidos a cura úmida através de banhos de imersão diários por cinco minutos, até o 27º dia.

Os ensaios de compressão foram realizados aos 28 dias no laboratório de ensaios mecânicos da Votorantim Cimentos – Unidade Porto Velho, após capeamento das amostras com enxofre para regularização das superfícies de contato com a prensa hidráulica. A máquina utilizada foi uma prensa Toni Technik, com capacidade de carga até 300 kN, configurada para aplicação de carga a uma velocidade constante de 0,25 MPa/s.

O ensaio de tração por flexão a quatro pontos foi desenvolvido a partir da preparação de chapas do compósito cimento-madeira nos traços já especificados neste trabalho. Para isto confeccionou-se as chapas nas dimensões de 400 x 100 x 15 mm, sendo em número de 10 corpos de prova, apenas para o teor de adição de resíduos que melhor desempenho apresentou nos ensaios de compressão. Neste caso, foi selecionado o traço T2, conforme desempenho apresentado.

As amostras para os ensaios de tração (Figura 4) passaram pelo processo de cura semelhante aos moldes utilizados para a compressão, até os 28 dias, quando então foram encaminhados ao Laboratório de Ensaios Mecânicos da Universidade Federal do Amazonas – UFAM para os testes. O conjunto foi então preparado conforme a NBR 12142:2010, marcados os afastamentos dos cutelos de apoio para a borda longitudinal da chapa em 50 mm e entre esses em três medidas de 100 mm.



Figura 7. Corpos de prova para ensaio de resistência à tração na flexão (Esq.) e preparação do dispositivo para ensaio (Dir.).

Fonte: imagem produzida pelo autor.

A máquina utilizada nos ensaios foi uma prensa Emic DL30000 com capacidade de carga de até 300 kN. Os corpos de prova foram marcados por seus terços a partir dos apoios laterais, sendo então ajustados os cutelos de aplicação de cargas. Os ensaios foram realizados a uma velocidade de carregamento constante de 0,5 mm/min.

Os resultados foram processados de acordo com as seguintes expressões (NBR 12142:2010):

$$F_{ctm} = \frac{PL}{BD^2} \quad (4)$$

Onde,

$F_{ctm}$  = resistência à tração na flexão, em Megapascals (MPa).

$P$  = carga máxima aplicadas, em Newton (N).

$L$  = distância entre cutelos de suporte, em milímetros (mm).

$B$  = largura média do corpo de prova na seção de ruptura, em milímetros (mm).

$D$  = altura média do corpo de prova na seção de ruptura, em milímetros (mm).

$$f_{ctm} = \frac{3 p a}{b d^2} \quad (5)$$

Onde,

$a$  = distância média entre a linha de ruptura na face tracionada e linha correspondente ao apoio mais próximo, em milímetros (mm).

A Equação (4) foi utilizada nos casos onde a ruptura dos corpos de prova ocorreu nos limites terço médio. A Equação (5) para os três casos de ruptura fora do terço médio, na direção dos cutelos de apoio.

Depois de realizados os ensaios de resistência à tração, foram analisados os Módulos de Ruptura (MOR) e Módulo de Elasticidade (MOE) utilizando-se as Equações (6) e (7), os quais estão demonstrados na Tabela 9.

$$MOR = \frac{P_{max} \times L_v}{b \times h^2} \quad (6)$$

Onde,

$P_{max}$  – Força máxima aplicada no corpo-de-prova (N)

$L_v$  – Distância entre os apoios inferiores (mm)

$b$  – Largura do corpo-de-prova (mm)

$h$  – Espessura do corpo-de-prova (mm)

$$MOE = \frac{1}{48} \times \frac{F \times L^3}{f \times I} \quad (7)$$

Onde,

$F$  – Força máxima aplicada no corpo-de-prova (N)

$f$  – Flecha máxima

$I$  – Momento de Inércia

$L$  – Comprimento do corpo de prova (mm)

O Momento de Inércia ( $I$ ) foi calculado pela Equação (8), de acordo com a largura ( $b$ ) e altura ( $h$ ) da seção transversal do corpo de prova.

$$I = \frac{b \times h^3}{12} \quad (8)$$

#### 2.2.4 Índices físicos

Os ensaios para caracterização física foram realizados no Laboratório de Solos da FARO – Faculdade de Rondônia, com base na NBR 9778:2005. Os corpos de prova cilíndricos utilizados foram os mesmos moldados para os ensaios de compressão axial, com dimensões de 50 mm x 100 mm. Para as avaliações físicas foram separados dois espécimes de cada traço estudado (T1 a T5), na quantidade total de 10 corpos de prova, visando levantar os dados em duplicata, e obtenção de um valor médio para as medições. O método utilizado foi a sequência de determinações dos índices por imersão dos corpos de prova em água limpa.

Os corpos de prova passaram por processos de secagem em estufa a 110 °C, pesagem a seco, saturação em água, pesagem hidrostática e pesagem saturada com superfície seca, registrando-se todas as massas em cada pesagem.

### 3 Resultados e Discussão

#### 3.1 Análise das características dos materiais

O cimento Portland CP IV-32, analisado e utilizado neste estudo, mostrou uma composição química (Tabela 3) compatível com as especificações da norma brasileira (NBR 5736:1991).

Os componentes silicoaluminosos ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$ ), característicos do material pozolânico, participam com cerca de 47 % na composição, não excedendo os limites normativos. O óxido de magnésio (MgO) encontrado foi em percentual mínimo, dentro do limite exigido pela norma.

A finura do cimento analisado foi verificada em 6,7 % e os tempos de início e fim de pega foram comprovados em 170 min e 380 min, respectivamente. Finura e tempos de pega também estão em consonância com os índices padronizados para este tipo de cimento.

O resultado da análise granulométrica do agregado miúdo coletado para o compósito está representado no gráfico da Figura 8.

Tabela 3. Composição química do CP IV-32 analisado.

Composição	Concentração (%)
MgO	1,585
$\text{Al}_2\text{O}_3$	11,351
$\text{SiO}_2$	35,632
$\text{P}_2\text{O}_5$	0,345
$\text{SO}_3$	4,6
$\text{K}_2\text{O}$	0,569
CaO	40,497
$\text{TiO}_2$	1,028
$\text{V}_2\text{O}_5$	0,032
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	0,018
MnO	0,028
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	3,96
ZnO	0,016

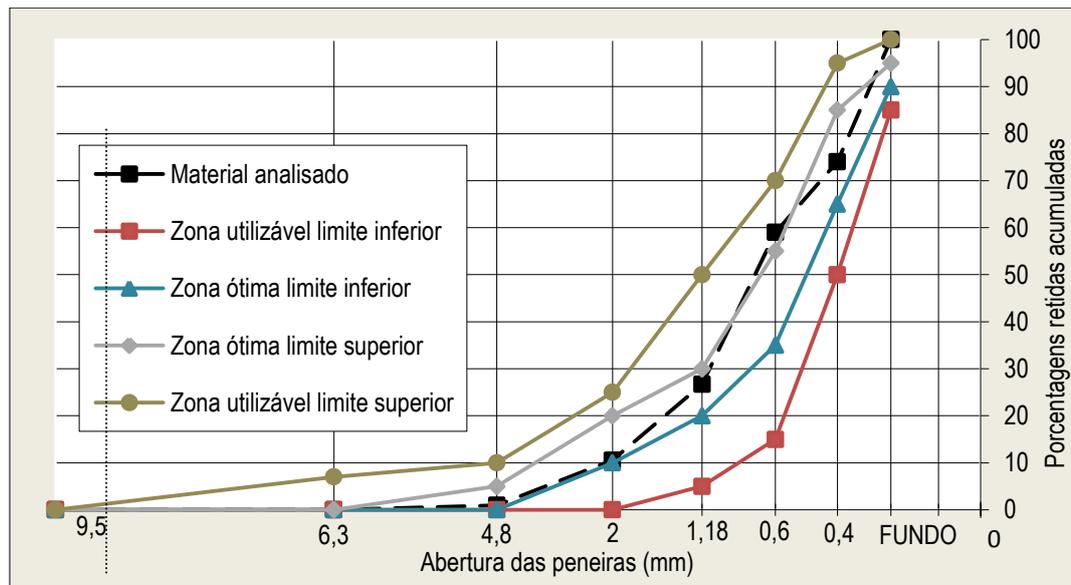


Figura 8. Granulometria da areia, com referência às zonas ótimas e utilizáveis padronizadas (NBR 7217:1987 e NBR 7211:2009).

Fonte: dados produzidos pelo autor.

Comparando-se a faixa granulométrica do material em estudo com as determinações da norma, observa-se que a mesma situa-se em intervalo médio em conformidade com os padrões, na faixa ótima de utilização. A faixa de grãos selecionados para este estudo, incluídos os finos, essenciais no preenchimento dos espaços entre grãos, favorece a compactidade do compósito e auxilia na redução dos vazios. O módulo de finura para o agregado classifica a areia em 2,71 (NBR 7211:2009). A umidade da areia determinada foi de 2,52 %.

A análise granulométrica dos resíduos, considerando o material na forma como coletado, a partir do diâmetro característico em 19 mm, apresentou os índices apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Granulometria e umidade dos resíduos (NBR 7217:1987 e NBR 7211:2009).

Características dos resíduos	Resultados
Dimensão máxima característica (mm)	19,00
Módulo de Finura	5,39±0,05
Umidade (%)	23,69±0,07

Após a análise de todos os materiais utilizados nos procedimentos experimentais foram encontrados os índices de massa específica como mostrado na Tabela 5, exceção do

cimento e da metacaulinita, onde os valores obtidos foram fornecidos pela Votorantim e por Marques (2015).

Tabela 5. Massas específicas ( $\rho$ ) dos materiais selecionados.

<b>Materiais</b>	<b><math>\rho</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Método/Fonte</b>
Resíduos	0,634±0,16	NBR 7190:1997
Areia	2,646±0,02	NBR 9776:1988
CP IV - 32	2,940±0,01	Votorantim Cimentos
Metacaulinita	2,660±0,01	Picnometria a gás Hélio (MARQUES, 2015)
Ca(OH) <sub>2</sub>	2,174±0,15	NBR NM 23:2001

O gráfico da Figura 8 mostra o consumo de cimento para os compósitos estudados. Com a substituição de parte do cimento pela metacaulinita e Ca(OH)<sub>2</sub> observa-se uma redução no consumo de cimento do traço T1 para 505 kg/m<sup>3</sup> na produção do traço T2. Considerando-se o compósito com maior teor de adição de resíduos (T4) a redução da massa de cimento por m<sup>3</sup> foi de aproximadamente 71 kg, representando 15,27% a menos de cimento em relação a T1.

Eliminando-se a massa dos resíduos (T5), mas mantendo-se a substituição de parte do cimento na especificação do traço, alcançou-se um índice de cerca de 0,5 % a menos de cimento por metro cúbico de argamassa.

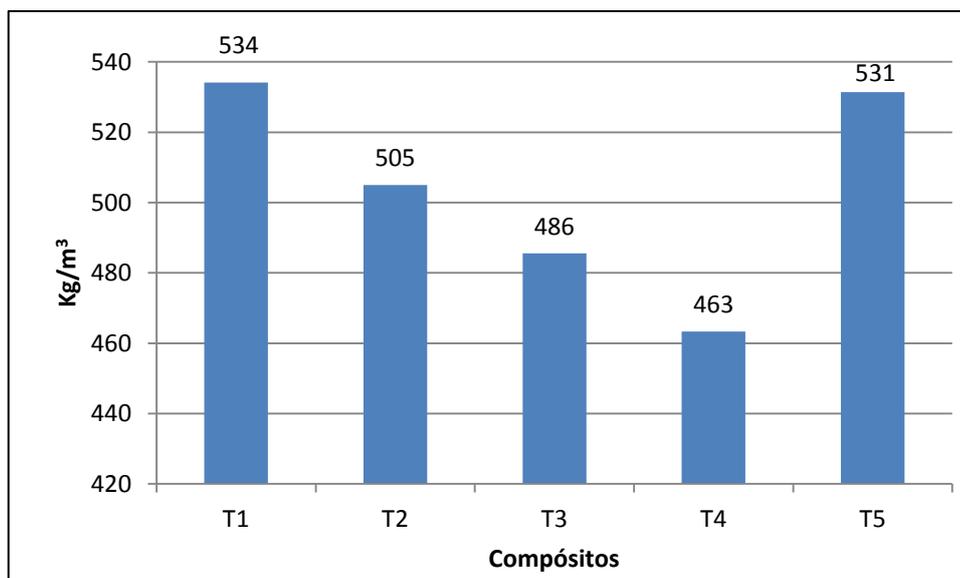


Figura 9. Consumo de cimento para os traços analisados.

Fonte: dados produzidos pelo autor.

### 3.2 Análise das características dos compósitos endurecidos

Nas primeiras avaliações em relação à produção dos compósitos, durante o processo de mistura, observou-se que sem a utilização de um componente de compatibilização entre o cimento e o resíduo madeireiro seria inviável a sua confecção. Este fato foi observado, quando da moldagem dos painéis para a análise térmica, após 3 dias de idade dos primeiros painéis com 2,5% de resíduos, não houve qualquer ganho de resistência, uma vez que a hidratação do cimento foi totalmente inibida (Figura 9), não sendo possível sequer removê-los do local, pois apresentaram características de desintegração ao menor esforço (esfarelamento).



Figura 10. Painéis produzidos sem adição da metacaulinita e  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ : sem ganho de resistência até 3 dias.

Fonte: imagem produzida pelo autor.

Na reformulação da composição da mistura pela adição da metacaulinita e do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , foi possível, na mesma idade do compósito, manipulá-lo e removê-lo do local, sem causar danos físicos, uma vez que já apresentavam ganhos de resistência aparentes.

Finalmente, após estabelecimento dos traços definitivos, moldagem e ensaios, passou-se a análise dos índices físicos do compósito endurecido, chegando-se aos resultados mostrados na Tabela 6.

Tabela 6. Características físicas dos compósitos endurecidos, determinadas por imersão em água.

Índices físicos	Compósitos				
	T1	T2	T3	T4	T5
Taxa Absorção H <sub>2</sub> O (%)	11,42±0,44	11,31±0,47	14,08±1,78	15,94±4,54	7,86±0,32
Volume Vazios (%)	20,93±0,73	21,28±2,63	22,61±3,16	24,49±5,01	14,36±0,28
Massa específica da amostra seca (g/cm <sup>3</sup> )	1,832±0,01	1,882±0,15	1,607±0,02	1,537±0,12	1,826±0,11
Massa específica da amostra saturada (g/cm <sup>3</sup> )	2,042±0,00	2,095±0,18	1,833±0,05	1,781±0,07	1,970±0,11
Massa específica real (g/cm <sup>3</sup> )	2,317±0,01	2,391±0,27	2,076±0,11	2,035±0,03	2,132±0,13

A taxa de absorção de água e o volume de vazios para os compósitos T1 e T2 não diferiram entre si em grau significativo. Isso mostra que a adição do pequeno teor de resíduos não interfere significativamente nesses itens. Já para os compósitos T3 e T4, estes apresentaram um aumento da taxa de absorção de água e do índice de vazios em semelhante proporção, de forma regular. O traço T5 apresentou uma queda significativa em absorção de água e em volume de vazios, certamente devido ao aumento da compacidade proporcionada pela metacaulinita e Ca(OH)<sub>2</sub> e pela ausência do resíduo madeireiro.

A menor massa específica da amostra seca foi obtida com a adição dos resíduos em maior teor (T4), que sofreu uma redução de cerca de 19% em relação ao traço de referência (T1). O compósito T2, embora tenha recebido um pequeno percentual do componente madeireiro, apresentou também pequeno aumento na massa específica da amostra seca, possivelmente causado pela adição do material fino (metacaulinita e Ca(OH)<sub>2</sub>), não necessariamente por causa das massas específicas individuais (pois estas são menores que a do cimento), mas por causa da finura. O traço T5, sem resíduos, manteve a massa específica compatível com a referência T1, embora, em relação a esta, tenha mostrado melhor desempenho em termos de compacidade (reduzido teor de vazios e de absorção de água).

### 3.3 Análise do desempenho térmico

As medições interna e externa, efetuadas simultaneamente nos painéis, mostraram o desempenho do material conforme Tabela 7. A temperatura interna foi aferida uma única vez em cada intervalo de tempo (6 min), e a externa quatro vezes, uma vez em cada face da caixa, por intervalo de tempo. A Tabela 7 mostra a temperatura de partida (tempo = 0 min), que representa a temperatura ambiente medida nas faces externas, e a temperatura externa e interna no tempo = 30 min. A variação refere-se à quantidade em percentual de calor gerado internamente que alcança a face externa no tempo = 30 min.

Tabela 7. Temperaturas médias nos painéis, no intervalo de 0 a 30 min.

Painéis		Início (°C, Tempo=0)	Externa (°C, Tempo=30)	Interna (°C, Tempo=30)	Variação Interna x Externa (%)
REFERÊNCIA	T1	28,7±0,14	40,7±0,88	59,0	31,01
CIMENTO-MADEIRA	T2	30,7±0,13	41,8±0,79	61,7	32,25
	T3	32,2±0,19	43,8±0,53	63,6	31,13
	<b>T4</b>	30,8±0,15	44,5±0,58	63,4	<b>29,81</b>

Os dados mostram que a variação percentual das temperaturas interna x externa, após 30 minutos, aumentou em cerca de 1 ponto entre a referência (T1) e o compósito T2; mas, isto não é significativo, por que a temperatura de início em T1 também foi menor. Porém, observa-se que, com o aumento do teor dos resíduos (T3, T4), a temperatura que chega à face externa diminui, mostrando a absorção térmica do material. Ou seja, o compósito T4 foi o que melhor isolou termicamente entre os ambientes interno e externo nos compósitos cimento-madeira avaliados, com uma taxa de redução da temperatura entre as faces interna e externa para 29,81 % do calor gerado, em média.

O presente estudo adaptou a metodologia de Adriaola (2008) em termos de construção dos dispositivos e equipamentos utilizados, mas sendo o objeto de estudo também os painéis cimento-madeira, é possível relacionar os dois trabalhos. Naquele a autora pesquisou painéis com espessura média de 17 mm e massa específica de 1,35 g/cm<sup>3</sup>. Assim, conseguiu uma variação entre as temperaturas interna e externa nos protótipos de cerca de

39%. A autora sugere que uma maior massa específica favorece uma maior condutividade térmica do material.

De acordo com a Tabela B-3 da NBR 15220-2:2003, a condutividade térmica da apara de madeira aglomerada com cimento em fábrica pode alcançar até 0,15 W/(m.K) para uma massa específica de 550 kg/m<sup>3</sup>. No entanto, na mesma referência, o material que apresenta massa específica aparente (amostra seca) próxima dos  $(1,537 \pm 0,12) \times 1000$  kg/m<sup>3</sup> (Tabela 6) é o fibrocimento, com 0,65 W/(m.K) de condutividade. A condutividade térmica crescendo na proporção da massa específica indica que o resíduo adicionado mais os vazios incorporados, os quais diminuem a massa específica, foram fundamentais para aumento da absorção térmica, conforme se pode observar também no gráfico da Figura 11.

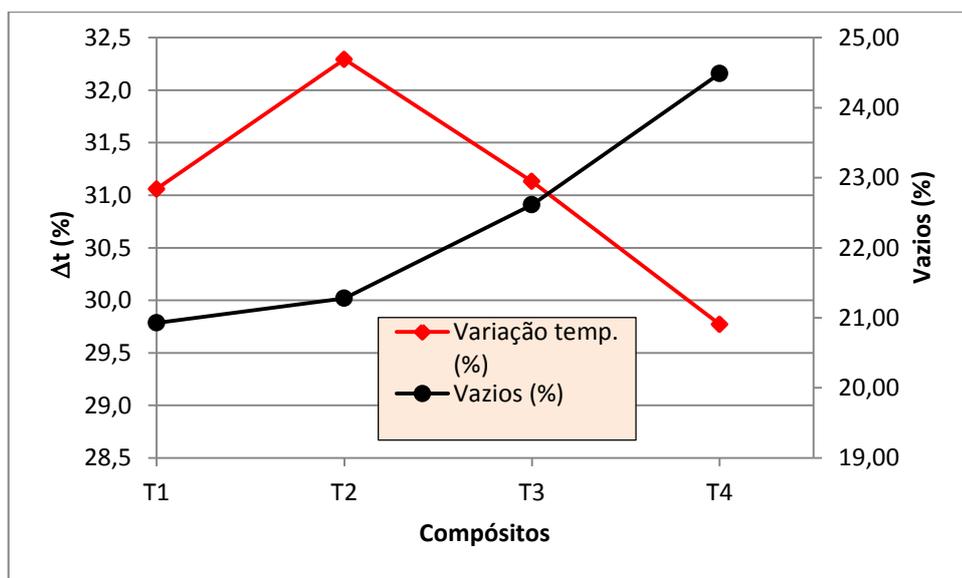


Figura 11. Variação da temperatura ( $\Delta t$ ) entre faces do dispositivo em relação ao teor de vazios.

Durante o ensaio e após cessada a emissão de calor, foi verificado o comportamento dos painéis em relação ao item E.4.4 da NBR 15575-4:2013 – *a ocorrência de fissuras, trincas, descolamentos ou outras deteriorações em ambas as faces do corpo-de-prova*, não havendo, em nível macroscópico, quaisquer alterações físicas nas amostras.

### 3.4 Análise da resistência à compressão

Após obtenção dos dados foram computados os resultados dos ensaios, através da Equação (3). As médias de resistência à compressão são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8. Resultados dos ensaios de resistência à compressão.

<b>RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)</b>					
<b>Compósitos</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>
Média	<b>17,06 ± 1,7</b>	<b>14,51 ± 2,3</b>	<b>9,35 ± 2,0</b>	<b>6,81 ± 1,2</b>	<b>20,41 ± 1,5</b>

Através dos dados obtidos, é possível comprovar a redução da resistência à compressão do material sob estudo, devido à adição do componente madeireiro. Para o menor teor de adição dos resíduos (T2) a diminuição da resistência, em relação à referência (T1) é pequena, com variação de cerca de 15%. A resistência tende a diminuir para os demais teores testados, chegando o compósito T4 a 60% menor que T1. No entanto, o valor médio de 6,81 MPa para T4 está acima do valor de referência compilado para compressão nos compósitos cimento-madeira, que é de 5,5 MPa (CAI & ROSS, 2010). Estes resultados também estão próximos aos obtidos em pesquisas anteriores que alcançaram valores de resistência à compressão na faixa de 3,6 a 6,9 MPa (RONQUIN *et al*, 2014).

No compósito T5, com o mesmo teor de metacaulinita e  $\text{Ca(OH)}_2$ , porém sem adição dos resíduos, esse apresentou aumento de resistência em comparação com T1, demonstrando o benefício da reação pozolânica e do efeito de preenchimento de vazios proporcionado pela metacaulinita.

### 3.5 Análise da resistência à tração por flexão

Os resultados dos testes de resistência à tração por flexão a quatro pontos são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9. Valores de MOR e MOE para ensaio de tração na flexão a 4 pontos.

	<b>MOR (MPa)</b>	<b>MOE (MPa)</b>
<b>MÉDIA</b>	<b>2,18±0,52</b>	<b>8356,62±1642,96</b>

Os ensaios de tração foram realizados apenas para o compósito T2, devido ao seu melhor desempenho nos testes de compressão. Depois da execução dos ensaios sobre 10 corpos de prova em forma de chapas prismáticas, os resultados foram válidos para 9 deles, sendo o espécime com resultados inconsistentes eliminado do conjunto.

A norma ISO 8335:1987 (*Cement-bonded particleboards – Boards of Portland or equivalent cement reinforced with fibrous wood particles.*) especifica requisitos de MOR em 9 MPa e MOE de 3000 MPa (DEL MENEZZI, 2007). Com referência a esses limites mínimos, fica comprovado que os valores de MOR encontrados neste trabalho ficaram abaixo das especificações padronizadas. Já para o MOE os resultados foram favoráveis, ficando acima das especificações mínimas. Por outro lado, os valores obtidos aproximam-se daqueles obtidos em outras pesquisas, para painéis similares em ensaio de tração na flexão, tais como os apresentados por Lima *et al* (2015) que obteve 1,95 MPa para o MOR, e Karade (2010) que apresentou índices de MOE variando entre 2,86 e 6.660 MPa.

#### **4 Conclusões**

Este trabalho analisou as características térmicas e mecânicas de compósitos cimento-madeira, em vários teores de resíduos, para aplicação como isolante térmico.

O uso de 10 % de metacaulinita e 5 % de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  reduziu o consumo do cimento por  $\text{m}^3$  em cerca de 14%, com conseqüente redução das emissões de  $\text{CO}_2$ , devidas ao processo de fabricação. Esta substituição também proporcionou uma redução no volume de vazios em 31% quando comparado com a mistura com 100% de cimento.

A substituição de 7,5 % do agregado miúdo por resíduos de madeiras proporcionou redução na massa específica, chegando a 19 % a menos em relação ao material convencional.

Quanto ao desempenho térmico, o compósito T4 foi o que melhor performance apresentou, reduzindo a transmissão de calor através do material de 31,01 % (T1) para 29,81 %. Com o aumento do teor de resíduos até 7,5%, a condutividade térmica entre as faces dos painéis foi reduzida, também, na proporção do volume dos vazios.

Quanto à resistência mecânica os compósitos apresentaram redução de 15% (T2) a 60% (T4) no desempenho à compressão.

Na resistência à tração o desempenho de 2,18 MPa e 8,4 GPa, respectivamente no MOR e MOE, se mostraram compatíveis com resultados apresentados em pesquisas anteriores e outros dispositivos de referências padronizadas.

De maneira geral, os resultados indicam a possibilidade de aplicação em controle térmico e acústico, em revestimentos de paredes e tetos, ou ainda, na composição de estruturas de vedação e painéis divisórios.

### **Referências**

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5736: Cimento Portland Pozolânico**. Rio de Janeiro ABNT, 1991. 5p.

\_\_\_\_\_ **NBR 5739: Argamassas e concretos endurecidos – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro ABNT, 2007. 9p.

\_\_\_\_\_ **NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação**. Rio de Janeiro ABNT, 2009. 9p.

\_\_\_\_\_ **NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro: ABNT, 1997. 8p.

\_\_\_\_\_ **NBR 7217: Agregados – Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro ABNT, 1987. 3p.

\_\_\_\_\_ **NBR 9778: Argamassas e concretos endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro ABNT, 2006. 4p.

\_\_\_\_\_ **NBR 12142: Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos**. Rio de Janeiro ABNT, 2010. 5p.

\_\_\_\_\_ NBR 15220-2: **Desempenho térmico de edificações Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações.** Rio de Janeiro ABNT, 2003. 21p.

\_\_\_\_\_ NBR 15575-4: **Edificações habitacionais — Desempenho Parte 4: Sistemas de vedações verticais internas e externas.** Rio de Janeiro ABNT, 2013. 5p.

\_\_\_\_\_ NBR NM 23: **Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro ABNT, 2001. 5p.

ADRIAZOLA, M. K. O. **Avaliação Experimental por meio de protótipos e por simulação de painéis de madeira para habitação de interesse social. 2008.** 315 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008. Disponível em: <<http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/handle/123456789/5006>> Acesso: 22/06/2016.

CAI, Zhiyong; ROSS, Robert J. **Mechanical properties of wood-based composite materials. Wood Handbook—Wood as an Engineering Material.** Forest Product Laboratory, – Madison, WI – p. 12-10 – USA, 2010.

CASTRO, V. **Avaliação dos efeitos de pré-tratamentos da madeira de *eucalyptus benthamii* maiden & cambage no grau de compatibilidade com cimento Portland.** Revista Árvore, Viçosa-MG, v.38, n.5, p.935-942, 2014.

DEL MENEZZI, Henrique Soares *et al.* **Production and properties of a medium density Wood-Cement boards produced with oriented strands and silica fume.** Maderas. Ciencia y tecnología 9(2): 105-115, 2007.

FADAI, Arileza *et al.* **Wood Based Construction for Multi-storey Buildings. The Potential of Cement Bonded Wood Composites as Structural Sandwich Panels.** *World Conference in timber engineering*, Auckland New Zealand, 15-19 July, 2012.

FAN Mizi *et al.* **Cement-bonded composites made from tropical woods: Compatibility of wood and cement.** *Construction and Building Materials* 36 (2012) 135–140, 2012.

KARADE, S. R. **Cement-bonded composites from lignocellulosic wastes**. Construction and Building Materials 24, 2010.

KARADE, S. R.; AGGARWAL, L. K. **Cement-bonded lignocellulosic composites for building applications**. Metals Materials and Processes, v. 17, n. 2, p. 129, 2005.

KRIZOVA, Klara; HELA, Rudolf. **Use of Green cement in concrete for friendly building construction**. Latest Trends in Sustainable and Green Development, p. 17-21, 2012.

LIMA, A. J. M. de. *et al.* **Study of the Interaction of Portland Cement and *Pinus* Wood for Composites using Bragg Sensors in Optical Fibers**. “Cement & wood sensing”. Bioresources 10(4), 6690-6704. 2015.

MACÊDO, Alcebiades Negrão *et al.* **Chapas de cimento-madeira com resíduos da indústria madeireira da Região Amazônica**. CEP, v. 66075, p. 110, 2012.

MARCHESAN, Raquel. **Rendimento E Qualidade De Madeira Serrada De Três Espécies Tropicais**. 2012. 94 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2012. Disponível em: <[http://www.floresta.ufpr.br/defesas/pdf\\_ms/2012/d592\\_0826-M.pdf](http://www.floresta.ufpr.br/defesas/pdf_ms/2012/d592_0826-M.pdf)> Acesso: 22/06/2016.

MARQUES, M. G. S. **Estudo das propriedades físicas e mecânicas e da durabilidade de compósitos cimentícios reforçados com fibra amazônica**. 2015. 234p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015. Disponível em: < <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-15022016-091455/es.php> > Acesso: 22/06/2016.

MEDINA, Engles Apaza. **Pozolanicidade do metacaulim em sistemas binários com cimento Portland e hidróxido de cálcio**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-12032012-120653/pt-br.php>> Acesso: 22/06/2016.

NA, Bin *et al.* **Wood–cement compatibility review.** *Wood Research*, v. 59, p. 813-825, 2014.

RONQUIM, Renato Marini *et al.* **Physical and Mechanical Properties of Wood-Cement Composite with Lignocellulosic Grading Waste Variation.** *International Journal of Composite Materials* 2014, 4(2): 69-72, 2014.

SOUZA, Tarcizo Cruz C. de *et al.* **Nanotubos de carbono: Um Caminho Para A Sustentabilidade De Materiais Cimentícios.** *Concreto e Construções. IBRACON.* Ano XLII, nº 77, p. 20-24, jan-mar, 2015.

TITTELEIN, Pierre *et al.* **Design of a low-density wood–cement particleboard for interior wall finish.** *Cement and Concrete Composites*, v. 34, n. 2, p. 218-222, 2012.

#### 4. ARTIGO 2

### **Desempenho acústico de painéis cimentícios produzidos com resíduos da indústria madeireira Amazônica por meio do método *in situ***

**Umberto Gonçalves Ribeiro**

**Raimundo Pereira de Vasconcelos**

#### **Resumo**

Um material bom absorvedor acústico proporciona melhor conforto acústico em ambientes fechados e diminui a intensidade da propagação sonora para outros ambientes ou área externa. O objetivo deste trabalho foi determinar o desempenho acústico de painéis de cimento-madeira, produzidos com adição de resíduos madeireiros amazônicos, para aplicação em conforto acústico, através da obtenção do coeficiente de absorção sonora do material. A matriz cimentícia foi desenvolvida com cimento Portland pozolânico CP IV-32 adicionado por metacaulinita (10%) e Ca(OH) (5%), visando melhorar o desempenho do compósito. Os resíduos, coletados na região de Porto Velho-RO, foram adicionados em teores de 2,5%, 5,0% e 7,5%. Para os testes de desempenho acústico foi construído um dispositivo com painéis medindo 0,50 x 0,50 m, de forma a aumentar a área útil para 1 m<sup>2</sup>, e assim estudar a influência dos resíduos adicionados. O compósito foi submetido a testes através do método *in situ*, baseado na emissão de um estímulo sonoro por uma fonte, o qual incide e reflete sobre o material em análise, captando-se as respectivas respostas impulsivas através de um microfone. Processados os sinais, traçou-se as curvas de absorção sonora, alcançando o índice de 49% de absorção sonora para o painel com adição de 7,5% de resíduos.

**Palavras-chave:** Compósitos Cimento-madeira. Materiais não convencionais. Painéis cimentícios. Desempenho acústico. Absorção sonora dos materiais.

## **Abstract**

*An optimal acoustic absorber material provides better acoustic comfort indoors and reduces the intensity of sound propagation to other environments or outside. The objective of this study was to determine the acoustic performance of cement-wood panels produced with the addition of Amazon wood waste for use in acoustic comfort by obtaining the sound absorption coefficient of the material. The cementitious matrix was developed with CP IV-32 Portland pozzolanic cement, added by metakaolin (10%) and Ca(OH) (5%), to improve composite performance. The waste collected in the region of Porto Velho, were added in amounts of 2.5%, 5.0% and 7.5%. For acoustic performance testing was constructed a device with panels measuring 0.50 x 0.50 m, in order to increase the useful area 1 m<sup>2</sup>, and so study the influence of waste added. The composite has been tested by the in situ method, based on the emission of a sound stimulus by a source, which focuses and reflects on the material analysis, capturing them their impulsive responses through a microphone. Processed signals, traced the curves of sound absorption, reaching the 49% rate of sound absorption for the panel with addition of 7.5% of wastes.*

**Keywords:** *Cement-Wood composites. Unconventional materials. Cement fiberboards. Acoustic performance. Absorption sound of the materials.*

## **1. Introdução**

O beneficiamento de madeiras em toros na região de Porto Velho, RO, na Amazônia brasileira, gera subprodutos, reportando 51 % de desuso para estes subprodutos. (MARCHESAN, 2012).

O aproveitamento dos resíduos lignocelulósicos, inclusive na adição em compósitos cimentícios, tem aplicação já comprovada, uma vez que as experiências com aplicações são datadas desde 1920 na Áustria, com crescimento significativo a partir da Segunda Guerra Mundial até 1976, na Alemanha. No entanto, a produção deste tipo de material ainda é considerada pequena (CABRAL, 2015), principalmente no Brasil, aonde, possivelmente por razões culturais, as opções por materiais convencionais ainda são prioritárias, não sendo levadas em conta as boas características de isolante térmico e acústico do material (IWAKIRI *et al*, 2012). Isto talvez por que os resíduos adicionados reduzem o desempenho mecânico, por causa da incompatibilidade entre a matéria lignocelulósica e o cimento Portland. (NA *et al*, 2014; MACÊDO *et al*, 2012).

Várias técnicas e processos de tratamento para os compósitos cimento-madeira têm sido estudados a fim de viabilizar a produção desses compósitos como materiais alternativos para o conforto térmico e acústico (RONQUIM, 2014).

A aplicação desses materiais na concepção das *smart-buildings* (construções inteligentes) visa também uma nova adequação à construção contemporânea, nos aspectos de desenvolvimento de materiais pré-moldados que facilitem o processo construtivo, melhoramento do conforto individual e coletivo, aí incluídas a não propagação de sons ou outras fontes geradoras de ruídos indesejáveis (como os ruídos de impacto), melhorando a convivência entre vizinhos, empreendimentos comerciais e industriais. Portanto, seja de fontes de impactos diretos (estruturais) ou de transmissões sonoras pelo ar, a aplicação de materiais adequados sobre pisos, em paredes de vedação ou no teto, pode trazer benefícios quanto ao conforto das edificações (CORNACCHIA, 2009).

No campo de estudo do desempenho acústico de edificações são considerados os aspectos de transmissão de ondas sonoras através do ar, as reverberações, reflexões e incidências nos fechamentos de ambientes e suas implicações na percepção auditiva humana.

Para o revestimento de paredes e pisos de ambientes especiais as faixas de frequência de propagação do som através do ar são especialmente consideradas (ANDRADE, 2009).

Neste sentido, a incidência sonora em edificações sofre atenuações devido à perda na transmissão sonora, através da transformação de parte da energia sonora em energia térmica (calor) absorvida pelo material aplicado e outra parte é refletida no ambiente da fonte. A perda na transmissão, no que tange à absorção pelo material, está relacionada ao grau de porosidade, em oposição ao elevado valor da massa específica, o qual tende a refletir o som, por ser um bom isolante sonoro. Além da frequência incidente, a rigidez à flexão, a ressonância (que tem relação com a área útil do painel sob análise) e a massa do material influenciam as perdas na transmissão (RIBAS, 2013).

Devido aos aspectos de propagação do som nos ambientes habitáveis (e também fora deles) é que, há mais de sete décadas, tem-se levado a testes os materiais, com o intuito de encontrar os melhores resultados para o conforto acústico. Então vários métodos de medições têm sido desenvolvidos, tais como as salas de reverberação e os tubos de impedância, os quais têm fornecido informações importantes para o melhor projeto de materiais para isolamento acústico (NAVA, 2009).

Outro método, denominado *in situ* ou “método de reflexão”, usualmente é aplicado em campos sonoros onde não haja reflexões em superfícies ou estruturas, a não ser aquela sob análise. Ou seja, necessita de um campo aberto ou salas livres de eco, porém pode ser desenvolvido no próprio ambiente de aplicação do material. As limitações à utilização dos métodos *in situ* estão principalmente nos efeitos de difração, os quais restringem a mais baixa frequência de testes a cerca de 200 Hz; frequências mais baixas também exigirão uma maior dimensão da amostra (WIJNANT, 2010). Um método *in situ* utilizado neste trabalho será mais bem apresentado na Seção 2.2.

É importante ressaltar que a escolha do ambiente para os testes dependerá particularmente do tipo de superfície e da aplicação a ser considerada. Por exemplo, a

medição dos ruídos causados por uma linha férrea sobre barreiras de proteção longitudinais requer um dispositivo montado no próprio local. Por outro lado, as simulações de campos difusos comuns para túneis ou edificações, locais fechados, podem ser efetuadas em laboratório onde as ondas sonoras se dispersam em todos os ângulos de incidência (GUIDORZI, 2013).

Então, neste estudo procurou-se avaliar a aplicabilidade de um material compósito à base de cimento-madeira, visando sua utilização para o conforto acústico. Tudo partiu do princípio de que, dependendo da composição do material e das suas características físicas (massa, densidade, porosidade, etc), a energia sonora é transformada em energia térmica e se dissipa no próprio material, podendo-se obter o coeficiente de absorção e a respectiva curva, o qual caracteriza cada material em termos do seu desempenho acústico (RIBAS, 2013).

Para aplicação do método *in situ* foi montado um dispositivo com os painéis de cimento-madeira pré-fabricados, cuja configuração permitiu realizar medições dos componentes incidente e refletido sobre o material em estudo e então, analisar o seu desempenho acústico.

A partir dos resultados alcançados é possível direcionar o uso do material para aplicações que requeiram melhoria no desempenho acústico, como sala de reuniões, salas de aula, refeitórios, etc., possivelmente realizando o revestimento interno de paredes de alvenaria. Isso permitiria a diminuição da reverberação sonora (eco) no ambiente e também da propagação do som através da parede revestida.

## **2. Materiais e Métodos**

Os passos para a preparação e análise do material foram desenvolvidos basicamente como na Figura 1.

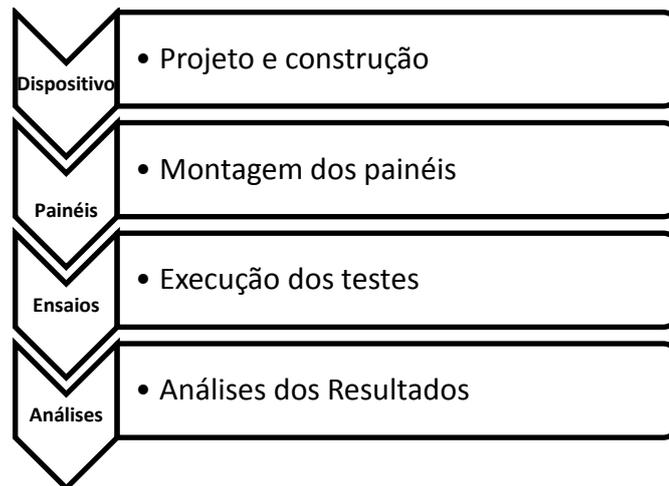


Figura 1. Metodologia básica dos ensaios.

## 2.1 Características dos painéis cimento-madeira

A Tabela 1 mostra a definição dos traços para a produção do compósito cimento-madeira e confecção dos painéis para ensaios.

Tabela 1. Definição dos traços para a produção do compósito cimento-madeira.

Traço	CP IV:metacaulinita: Ca(OH) <sub>2</sub> : areia : resíduo	Descrição	CP IV (kg/m <sup>3</sup> )
T1	1:0:0:3:0	Referência-1(NBR 7215:1996)	534,13
T2	0,85:0,1:0,05:2,925:0,075	2,5% resíduo	504,95
T3	0,85:0,1:0,05:2,850:0,150	5,0% resíduo	485,53
T4	0,85:0,1:0,05:2,775:0,225	7,5% resíduo	463,35

O compósito cimento-madeira, após submetido análise de características físicas em estado endurecido, apresentou os índices conforme a Tabela 2.

Tabela 2. Características físicas dos compósitos endurecidos, determinados por imersão em água (médias).

Índices físicos	Compósitos			
	T1	T2	T3	T4
Taxa Absorção H <sub>2</sub> O (%)	11,42±0,44	11,31±0,47	14,08±1,78	15,94±4,54
Volume Vazios (%)	20,93±0,73	21,28±2,63	22,61±3,16	24,49±5,01
Massa específica da amostra seca (g/cm <sup>3</sup> )	1,832±0,01	1,882±0,15	1,607±0,02	1,537±0,12
Massa específica da amostra saturada (g/cm <sup>3</sup> )	2,042±0,00	2,095±0,18	1,833±0,05	1,781±0,07
Massa específica real (g/cm <sup>3</sup> )	2,317±0,01	2,391±0,27	2,076±0,11	2,035±0,03

## 2.2 Avaliação do desempenho acústico

Uma vez produzidos os painéis nas dimensões especificadas de 500 x 500 x 15 mm, após os 28 dias de cura e endurecimento, foi construído um dispositivo (Figura 2) em suporte de madeira, para a verificação do desempenho acústico. Os painéis foram montados cuidadosamente, de forma a não causar avarias nas bordas ou perdas do material por quebras acidentais, em um conjunto de quatro peças formando uma área útil de raio igual a 0,50 m.

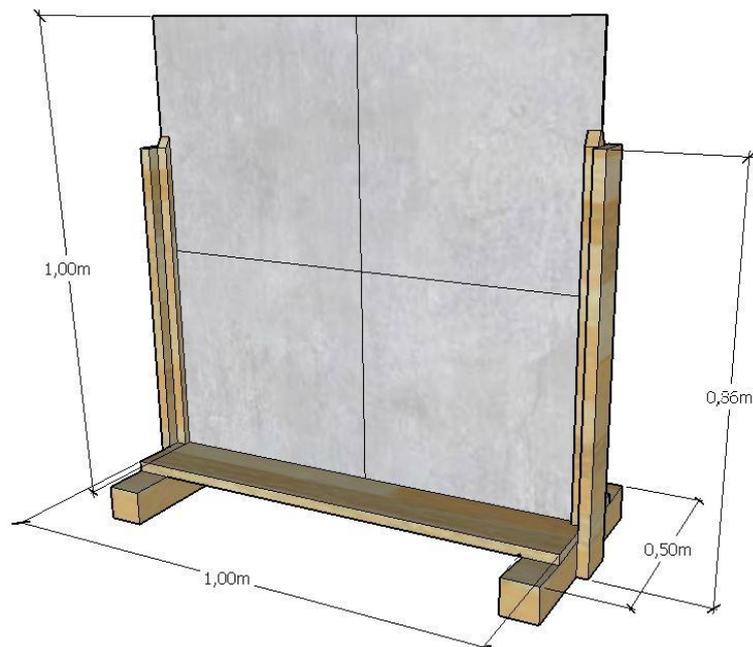


Figura 2. Dispositivo destinado aos ensaios de desempenho acústico.  
Fonte: imagem produzida pelo autor.

Os painéis foram colados utilizando-se uma pasta cimentícia idêntica à matriz de cimentação dos painéis, formando um único painel do mesmo compósito, de área igual a 1 m<sup>2</sup>.

A montagem deste aparato possibilitou a verificação do coeficiente de absorção sonora do material, mediante a submissão da amostra a um sistema de incidência de ondas acústicas, com interesse na componente normal entre a fonte e o corpo de prova (Figura 3). Como o material convencional foi alterado quanto a sua massa específica e estrutura interna, com a

adição dos resíduos e outros aditivos, é possível avaliar o desempenho do material, traçando sua curva de absorção em função da frequência, e representá-lo em banda de um terço de oitava (RIBAS, 2013). Para desenvolvimento da série de ensaios nos painéis T1 a T4 optou-se pelo método *in situ* (BÉRENGIER, 2002; GUIDORZI, 2008; GUIDORZI, 2013; RIBAS, 2013), baseado na emissão e captação de impulsos sonoros.

#### ***Descrição do método in situ***

O método *in situ* para obtenção do coeficiente de absorção pela reflexão baseia-se na separação das energias de campo sonoro livre que incidem e refletem na amostra, considerando-se um determinado ângulo de incidência (BÉRENGIER, 2002).

O referido método possui uma relativa facilidade na construção do dispositivo, no qual a fonte e o microfone podem estar rigidamente conectados, porém é obrigatório que todos os seus parâmetros sejam controlados (Figura 3). Como neste caso são empregadas técnicas de abertura de janelas temporais nas análises dos impulsos direto e refletido, torna-se imprescindível que haja uma especial atenção quanto ao tamanho da amostra, pois as dimensões da mesma possuem relação direta com o tamanho da respectiva janela temporal. Ou seja, quanto menor o tamanho da amostra, maiores os efeitos das ondas difratadas nas bordas e menor o tamanho da janela temporal a ser aplicada, para superar as interferências das difrações e outros ruídos (KUIPERS *et al*, 2012).

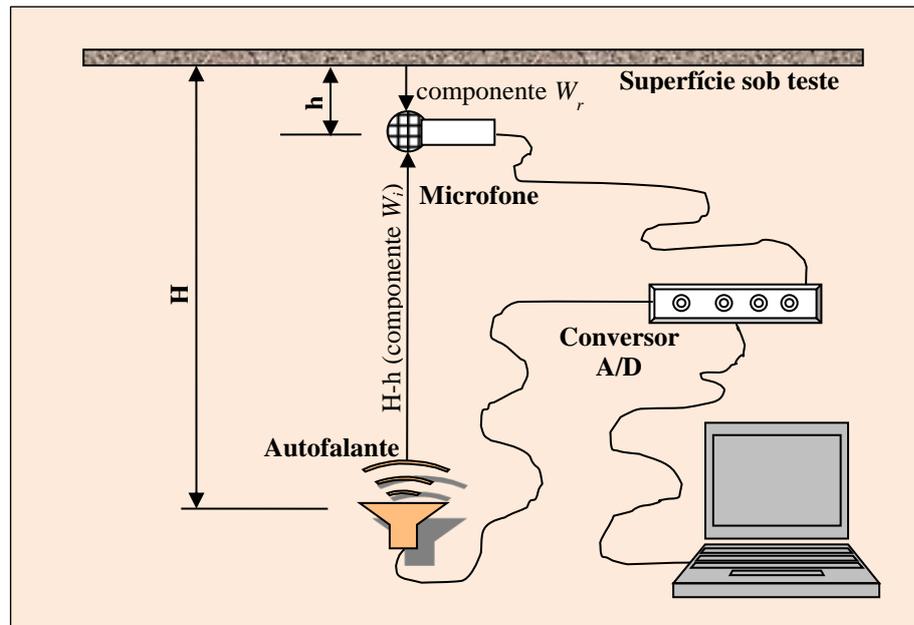


Figura 3. Configuração esquemática do dispositivo para o método *in situ*, considerando o ângulo de incidência perpendicular à amostra.

Fonte: imagem produzida pelo autor.

O equipamento necessário para realização do método *in situ* é composto de uma fonte (autofalante montado numa caixa de som), um microfone e um sistema de aquisição de sinais digitais (conversor analógico/digital-digital/analógico (A/D-D/A)). Estima-se a resposta impulsiva entre a fonte e o microfone próximos à superfície refletora a ser ensaiada. Os sinais de estímulo emitidos pela fonte são captados pelo microfone (impulsos diretos), chocam-se com a superfície sob testes e os sinais não absorvidos pelo material, refletem-se na direção contrária (impulsos refletidos), sendo captados pelo mesmo microfone (BÉRENGIER, 2002).

Intuitivamente, o coeficiente de absorção sonora  $\alpha_i$  será dado por (WIJNANT, 2010; RIBAS, 2013):

$$\alpha_i \cong \frac{W_i - W_r}{W_i} \quad (1)$$

Onde:

$W_i$  a potência sonora incidente direta (dB) e;

$W_r$  a potência sonora refletida (dB).

Para a obtenção de  $\alpha_i$  será necessário fazer a leitura dos sinais sonoros captados e digitalizados e a separação dos componentes de incidência direta ( $W_i$ ) e refletida ( $W_r$ ), através da abertura de janelas temporais relacionadas com as distâncias configuradas e o raio da amostra.

### ***Parâmetros de ensaio e técnicas utilizadas***

Neste estudo, a superfície ativa da amostra de 1 m<sup>2</sup>, montada no suporte com as distâncias  $H = 1,35$  m e  $h = 0,10$  m (Figura 3), com altura do microfone ao solo em 0,60 m, permite adotar uma janela temporal com cerca de 1,5 milissegundos (ms), conforme Guidorzi (2008), que utilizou a Equação (2) para determinação do raio da superfície ativa para vários tamanhos de janelas temporais.

$$r = \frac{1}{H + h + cT_w} \sqrt{\left(H + h + \frac{cT_w}{2}\right) \left(H + \frac{cT_w}{2}\right) (2h + cT_w) cT_w} \quad (2)$$

Onde:

$r$  = raio da superfície ativa;

$H$  e  $h$  são, respectivamente as distâncias do autofalante e do microfone para a superfície sob testes, em metros;

$T_w$  é o tamanho da janela de análise de dados, em segundos e;

$c$  é a velocidade do som ( $\cong 345$  metros/segundo).

Assim, a operação de definição da janela temporal para separação das respostas impulsivas  $W_i$  e  $W_r$ , leva em conta os tempos de chegadas dos respectivos sinais de estímulos, ambos captados pelo microfone, porém aparecendo em tempos diferentes entre incidência direta e refletida (GUIDORZI, 2008). Para a aplicação da janela temporal baseada na configuração do dispositivo apresentado, foram adotados os tempos de chegadas (considerando a velocidade do som = 345 m/seg) mostrados na Tabela 3.

Tabela 3. Percursos de interesse para os ensaios acústicos.

Percurso	Tempo de chegada (ms)
Autofalante – superfície (H = 1,35 m)	4
Autofalante – microfone (H-h = 1,25 m)	3,5
Microfone – superfície (h = 0.10 m)	0,3
Microfone – superfície – microfone (2h = 0.20 m)	0,6

Uma vez definido o tamanho da janela temporal, faz-se necessário a separação entre os componentes  $W_i$  e  $W_r$ ; para isto, é usual empregar-se a *técnica da subtração* de sinal. Considera-se ainda que além dos componentes de interesse, podem ocorrer outras reflexões “parasitas”  $W_p$ . (GUIDORZI, 2013). Na técnica da subtração o componente  $W_r$  é obtido da resposta impulsiva total após a subtração de um sinal idêntico ao componente  $W_i$ . Isto quer dizer que o sinal idêntico, aqui denominado  $W'_i$ , deve ser um componente conhecido e bem caracterizado, geralmente obtido pela realização de um ensaio de campo-livre, sem o bloqueio do sinal de estímulo pela superfície em análise (GUIDORZI, 2013), de maneira que não haja elemento de bloqueio próximo, a não ser o solo.

A técnica da subtração, ao tempo em que é uma importante ferramenta na separação dos sinais de interesse no ensaio de reflexão, é também sensível na precisão dos resultados e, se implementada de forma direta, pode trazer pequenos erros nos resultados. Isso por que entre duas medições consecutivas pode haver alterações devido a variações de temperatura, ventos e até variações de respostas de equipamentos por causa de aquecimento ou desvios elétricos. Então, caso necessário, poderão ser aplicados métodos de compensação para essas interferências (ROBINSON, 2010).

Da descrição da técnica da subtração de sinais pode-se afirmar que:

$$\beta = (W_i + W_r + W_p) - W'_i = W_r + W_p \quad (3)$$

Onde:

$\beta$  = Resultado do cancelamento do componente direto  $W_i$ ;

$W'_i$  = componente direto de campo-livre, idêntico a  $W_i$  e ;

$W_p$  = componentes parasitas.

Os componentes  $W_p$  podem também ser reduzidos posteriormente, fazendo-se a aferição dos ruídos e sua subtração de  $\beta$  resultante.

Sabendo-se que a escala em decibéis possui uma definição logarítmica, as operações para a técnica da subtração foram aplicadas de acordo com a diferença entre o maior e o menor níveis de pressões sonoras ( $\Delta NPS$ ) consideradas. Assim, querendo obter a soma ( $NPS_T$ ) entre dois níveis de pressões sonoras  $NPS_1$  e  $NPS_2$ , deve-se fazer  $NPS_T = NPS_1 + \Delta NPS$ , com  $\Delta NPS$  dado conforme a equação (4).

$$\Delta NPS = 10 \log \left[ 1 + 10^{-\left(\frac{NPS_1 - NPS_2}{10}\right)} \right] \quad (4)$$

Embora o componente  $W'_i$  possa ser obtido em um ensaio de campo-livre realizado ao ar livre, longe de quaisquer barreiras ao sinal de estímulo, é comum haver interferências parasitas que podem “mascarar” o espectro nele obtido, como variações ambientais, devido à sensibilidade do método (MASSARANI, 2001; BÉRENGIER, 2002). Assim, pode-se obter os componentes de interesse ( $W_i$ ,  $W_r$  e  $W'_i$ ) em uma sala comum, realizando-se a abertura da janela temporal no tempo de chegada apropriado (Tabela 3).

Levando-se em conta que a precisão da resposta em frequência do dispositivo sofre uma deterioração nas frequências mais baixas e nas menores dimensões da amostra, devido à rigidez e ressonância do material (RIBAS, 2013) e que a validade dos ensaios segue um limite mínimo de frequência estabelecido em  $f_{min} \cong 1/T_w$  (GUIDORZI, 2008), adotou-se, no presente estudo, resultados válidos para as frequências acima de 700 Hz, para uma janela  $T_w$  de 1,5 ms com um dimensionamento do dispositivo como apresentado anteriormente (Figura 2). Como limite máximo adotou-se 8000 Hz, visando avaliar limites extremos, embora pesquisas anteriores tenham utilizado limite superior em torno de 5000 Hz (GUIDORZI, 2013; ANDRADE, 2009).

### ***Realização dos ensaios***

Foi gerado um sinal digital de excitação através do software Audacity® (Figura 4), com forma de onda senoidal, frequência de 1000 Hz e amplitude 0,8, com duração de 700 ms, quantização em 32 bit e amostragem de 44.1 kHz, seguindo os parâmetros empregados por Massarani (2001). A frequência de excitação escolhida em 1000 Hz deveu-se ao fato de estar entre os valores centrais de bandas de 1/3 de oitava para cálculo de reverberações (100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150 e 4000 (Hz) (RIBAS, 2013)), sendo padrão de frequência para estudos da física acústica (SERWAY, 2011) e estar acima da frequência mínima para validade dos ensaios neste trabalho.

Os ruídos acidentais presentes nos sinais em análise foram minimizados através de:

- Isolamento máximo do local dos ensaios contra ruídos indesejáveis;
- Eliminação dos dados obtidos em frequências mais baixas, pelo parâmetro  $f_{min}$ .

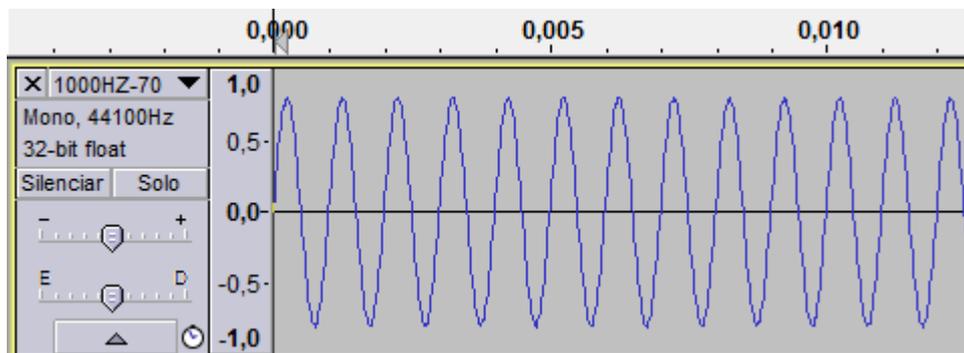


Figura 4. Forma de onda de excitação gerada pelo Audacity®.

Fonte: imagem capturada do software.

O local disponível para os ensaios foi uma sala medindo aproximadamente 14 m<sup>2</sup> e poucos móveis. A temperatura ambiente durante os testes estava em torno de 30 °C. Os painéis produzidos nos traços T1, T2, T3 e T4 possuíam idades acima dos 28 dias. Foram utilizados os mesmos painéis montados subsequentemente para cada traço da série, colados com uma pequena quantidade de pasta da matriz cimentícia de moldagem. A configuração

completa do dispositivo de ensaios ficou estruturada como na foto da Figura 5, mantendo-se a incidência perpendicular ( $0^\circ$ ) entre a fonte e a superfície sob análise, tendo o cuidado de não alterar a configuração nas trocas dos painéis.



Figura 5. Configuração após montagem dos painéis, microfone e fonte.  
Fonte: imagem produzida pelo autor.

O sinal oriundo da fonte, bem como os sinais captados pelo microfone foram transmitidos/recebidos pela mesma interface analógico/digital, através dos canais de entrada e saída. O equipamento utilizado foi uma placa M-AUDIO M-TRACK PLUS (Figura 6-a) com entradas para microfones com frequência de resposta de 20 Hz – 20 kHz ( $\pm 0.1$  dB) e relação sinal/ruído de 104 dB, e saídas *Main* com frequência de resposta de 20 Hz – 20 kHz ( $\pm 0.3$  dB) e relação sinal/ruído de 102 dB. Os sinais foram captados por um microfone condensador (Figura 6-b) com frequência de resposta de 20 Hz – 20 kHz, relação sinal/ruído de 78 dB e sensibilidade de  $-33$  dB  $\pm 0.3$  dB (0dB=1V/Pa 1 kHz).



Figura 6. Interface analógico/digital (a) e microfone, utilizados nos ensaios de reflexão  $W_r$  (b) e incidência direta de campo-livre  $W_i$  (c).

Fonte: imagens produzidas pelo autor.

Após a excitação e obtenção dos sinais da resposta impulsiva foi realizado o respectivo processamento, utilizando-se um computador com as seguintes características:

Tabela 4. Características do sistema de processamento dos sinais.

Nome do Sistema Operacional	Microsoft Windows 7 Home Premium
Tipo do sistema	x64-based PC
Processador	Intel(R) Core(TM) i5-2450M CPU @ 2.50GHz, 2501 Mhz, 2 Núcleo(s), 4 Processador(es) Lógico(s)
Memória Física (RAM) Instalada	6,00 GB

A leitura e interpretação dos sinais incidente  $W_i$  e refletido  $W_r$ , bem como a aplicação dos cortes para as janelas temporais em estudo, foram feitos com os softwares:

**Audacity®** – Geração do sinal digital de excitação e conversão analógico-digital dos sinais captados pelo microfone.

**Cubase LE** – identificação e separação das respostas impulsivas e geração dos espectros de frequência, através dos parâmetros dos tempos de chegada e da dimensão das janelas temporais.

A obtenção da resposta incidente de campo-livre foi feita executando-se o sinal de excitação ortogonalmente ao microfone (Figura 6-b) sem a presença da superfície em estudo, mantendo-se a configuração das distâncias observadas para a reflexão, porém com a superfície mais próxima (paredes) a não menos que 1,50 m. Foram tomadas duas amostras para obtenção posterior da média dos valores do espectro incidente de campo-livre. A abertura da janela para a obtenção deste componente foi efetivada iniciando o corte a partir de 5 ms e estendendo-se até 6,5 ms, aplicando-se uma função de janela Hamming com tamanho de 4096 pontos entre as frequências de 700 Hz e 8000 Hz, e com precisão de 10,77 Hz, tomando-se o cuidado de permanecer com a amostragem antes dos 8 ms, quando já ocorreriam as reverberações em potencial.

O componente refletido irá surgir entre os sinais captados pelo microfone apenas a partir de 0,6 ms (percurso microfone-superfície-microfone, Tabela 3). Por isso optou-se por iniciar o corte a partir de 1 ms, estendendo a janela até 2,5 ms, também em uma função Hamming nas mesmas configurações para o ensaio de campo-livre, para obtenção das frequências refletidas. A obtenção dos dados incidentes e refletidos, bem como a construção dos espectrogramas, foi feita com o Cubase LE, em razão da sua maior precisão para leitura destes valores.

A partir da obtenção de  $W_i$  e de  $W_r$  pôde-se então calcular, pela técnica da subtração, o valor do componente refletido real, através da Equação (3), fazendo-se o cancelamento de  $W_i$  no momento da obtenção da reflexão do sinal.

### **3 Resultados e discussões**

Para os ensaios de campo-livre simplesmente foram removidos os painéis sob teste, certificando-se que não houvesse quaisquer barreiras com distância, de incidência direta ou refletida, menor que a distância do componente  $W_i$  (1,25 m).

Com a obtenção da média para o componente  $W'_i$  e aplicando-se a Equação (3), foram obtidos os valores dos componentes refletidos  $W_r$  nos painéis T1 a T4 (Tabela 5).

Tabela 5. Média do nível de pressão sonora refletida nos painéis estudados (700-8000 Hz).

$W_r$ (dB)			
T1	T2	T3	T4
-32 ± 11	-25 ± 8	-26 ± 6	-31 ± 8

Os valores na Tabela 5 são apresentados com números negativos, uma vez que, conforme o Analisador de espectro do Cubase LE para o painel T4 (Figura 7), o sinal de estímulo emitido e captado pelo microfone sofreu atenuação oscilante conforme a frequência, e o sinal negativo indica a magnitude de atenuação em relação ao dB = 0. Portanto, o compósito T4 mostra-se refletindo menor potência sonora que os demais compósitos com resíduos, indicando melhor dissipação sonora no material.

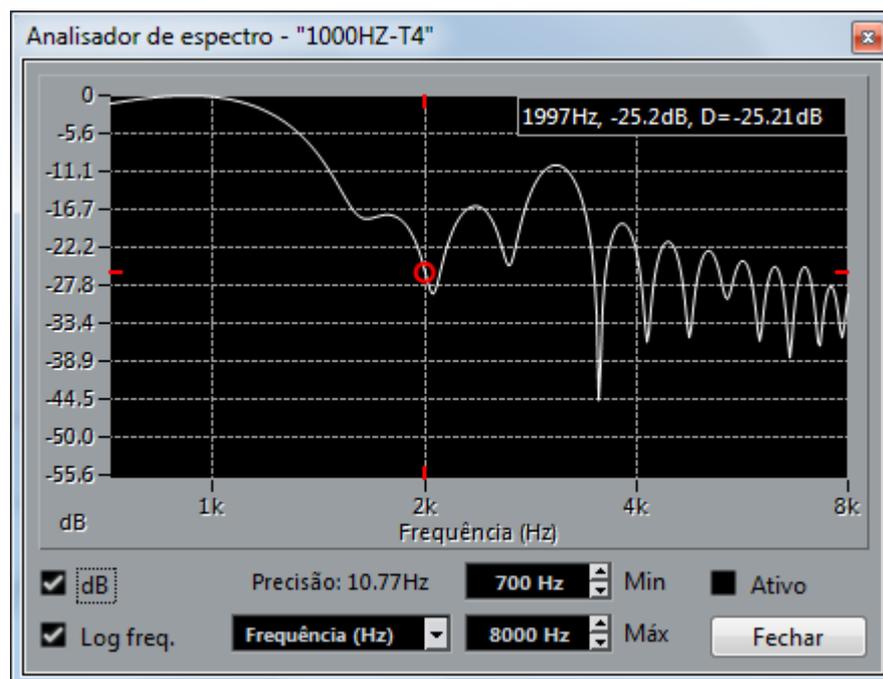


Figura 7. Análise de espectro de frequência para T4, mostrando a magnitude de atenuação do sinal de estímulo.

Fonte: imagem capturada do software.

A faixa de frequências entre o limite  $f_{min}$  (700 Hz) estabelecido e 1250 Hz sofreram deteriorações nos resultados, possivelmente causadas pela difração devida às dimensões reduzidas e espessura da amostra, ou até mesmo pela sensibilidade da análise em tamanho reduzido da janela temporal. Desta forma, o limite mínimo de frequência, considerado válido para a análise do coeficiente de absorção sonora, passou a ser 1600 Hz.

Com os dados obtidos nos ensaios para cada painel e utilizando-se a Equações (1) e (4), foi possível traçar as curvas de absorção sonora para as respectivas amostras em bandas de 1/3 de oitava na faixa de frequência entre 1600 e 8000 Hz, chegando-se às taxas para o coeficiente de absorção, mostradas na Tabela 6.

Tabela 6. Coeficientes de absorção sonora ( $\alpha_i$ ) para os painéis T1 a T4, em frequências de bandas de 1/3 de oitava, acima de 1250 Hz.

FREQUÊNCIA	$\alpha_i$			
	T1	T2	T3	T4
1600	0,27	0,04	0,09	0,20
2000	0,62	0,36	0,55	1,00
2500	0,44	0,34	0,40	0,70
3150	0,22	0,16	0,21	0,07
4000	0,04	0,05	0,04	0,40
5000	0,74	0,13	0,37	0,19
6300	0,12	0,10	0,05	0,21
8000	0,77	0,32	0,21	0,26
<b>MÉDIA</b>	<b>0,40±0,28</b>	<b>0,19±0,13</b>	<b>0,24±0,18</b>	<b>0,38±0,31</b>

Na Tabela 6 é possível notar que o painel T4 mostra resultados semelhantes a T1, para as amostras com os parâmetros testados. Por outro lado, para as faixas de frequência entre 2000 e 4000 Hz o painel T4 (7,5% de adição de resíduos) supera os índices de absorção. Cabe salientar que as medições foram realizadas sobre painéis em camada única, desconsiderando os efeitos favoráveis dos painéis em multicamadas, com possível material de preenchimento (RIBAS, 2013), não utilizado neste trabalho.

A partir da análise do espectro do sinal  $W'_i$  e da média dos ruídos de fundo, medidos nas mesmas condições e local dos ensaios, para a mesma faixa de frequências, a relação sinal/ruído básica (SNR) ficou com média de 0,78.

A leitura dos sinais de ruídos de fundo foi verificada com média de -63 dB de pressão sonora, na faixa de frequência entre 689 Hz e 8269 Hz, contra média de -48 dB de sinal de interesse, nas respostas impulsivas da incidência direta de campo-livre. A partir destes dados foi possível construir as curvas de sobreposição de espectros para a SNR, mostradas no gráfico da Figura 8.

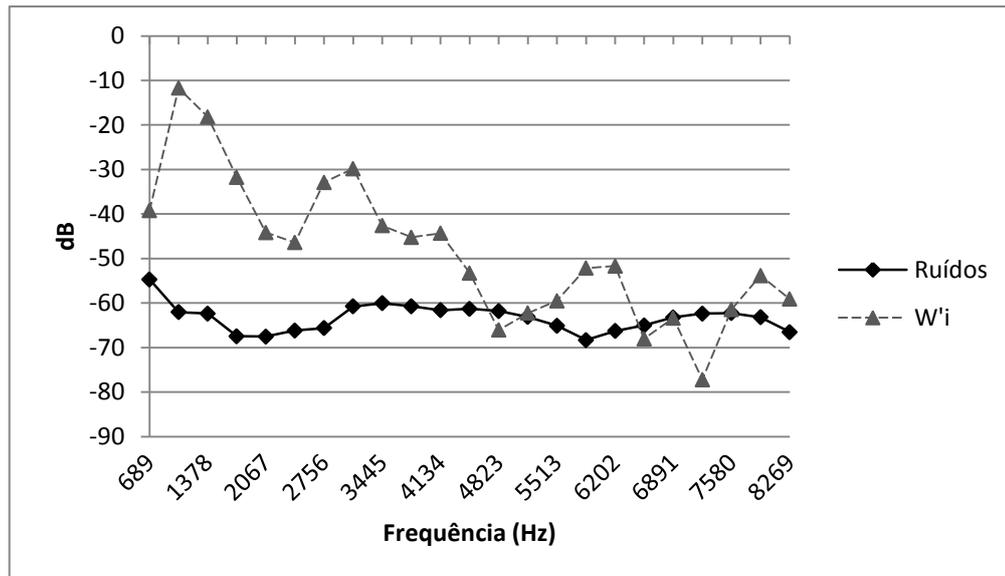


Figura 8. Sobreposição entre o componente direto de campo-livre  $W'_i$  e os ruídos de fundo.  
Fonte: gráfico produzido pelo autor.

Comparando-se os sinais de campo-livre ( $W'_i$ ) e os ruídos de fundo no gráfico da Figura 8 é possível verificar um distanciamento entre os sinais apenas nas frequências abaixo de 4823 Hz. Sabendo-se que as frequências de interesse são comumente selecionadas entre 100 e 3150 Hz (ANDRADE, 2009) e que o limite mínimo adotado neste trabalho  $f_{min} = 700$  Hz, é possível verificar que ocorrem interferências entre os ruídos e os sinais válidos, mesmo para os componentes refletidos, uma vez que estes foram preditos com base em  $W'_i$ .

Então, extraído-se dos dados da Tabela 6, a faixa de frequências livres dos ruídos indesejáveis, alcançou-se a média do coeficiente de absorção sonora nos painéis T1 e T4, na faixa de 1600 a 3150 Hz, conforme a Tabela 7. O gráfico da Figura 9 também mostra a evolução do índice de absorção sonora, o qual cresce na medida do teor de resíduos, que provoca, por sua vez, o aumento dos vazios.

Tabela 7. Coeficiente de absorção sonora para os painéis T1 e T4 reduzindo-se os ruídos de fundo e reverberações residuais.

$\alpha_i$	
T1	T4
$0,39 \pm 0,16$	$0,49 \pm 0,13$

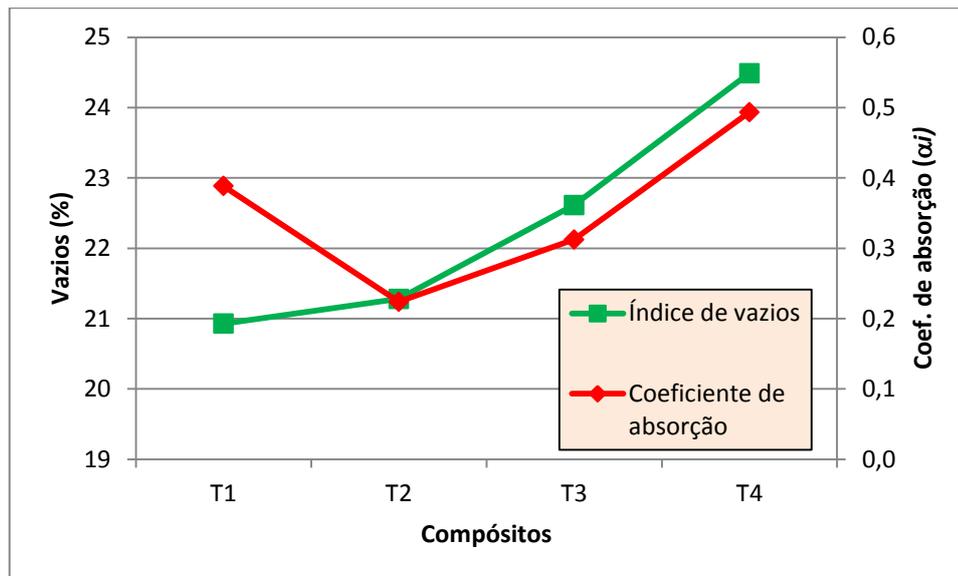


Figura 9. Evolução da absorção sonora com relação ao volume de vazios nos compósitos da série “T” (frequências de 1600-3150 Hz).

Fonte: dados produzidos pelo autor.

Ainda observando-se a Tabela 6, sendo  $\alpha_i$  obtido para todos os painéis sob análise, é possível concluir que, para a faixa mais ampla de frequências entre 1600 e 8000 Hz, as interferências são mais perceptíveis nos maiores teores de resíduos (T3 e T4), causando menos efeito sobre o painel T1, de referência.

#### 4 Conclusões

Este trabalho avaliou o desempenho acústico de painéis de cimento-madeira produzidos com resíduos do beneficiamento de madeiras da região Amazônica, com teores de resíduos em 0,0%, 2,5%, 5,0% e 7,5% de adição.

A faixa de frequência considerada válida para os resultados aqui apresentados foi entre 1600 Hz e 3150 Hz, em bandas de 1/3 de oitava, para painéis com área útil de 1 m<sup>2</sup> e espessura de 15 mm, limitada em razão da configuração dos ensaios.

O painel T4 apresentou melhor desempenho que aquele sem adição de resíduos, alcançando 49% para o coeficiente de absorção, contra 39% do painel de referência.

Os dados analisados também se mostraram mais sensíveis às interferências de ondas sonoras indesejáveis quanto maior o teor de resíduos adicionados, principalmente para as altas frequências.

O material analisado apresentou potencial aplicação para revestimentos com finalidades de adequação acústica, considerando-se os índices alcançados.

### Referências

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: **Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.8p.

ANDRADE, Carlos Alberto Rodrigues. **Vibroacoustic and Sound Intensity Study of Flanking Transmission in Buildings**. Tese de Doutorado. Universidad de Valladolid, Valladolid, Espanha, 2009. Disponível em: <<https://bibliotecadigital.ipb.pt/bitstream/10198/1282/1/Vibroacoustic%20and%20sound%20intensity%20study%20of%20flanking%20transmission%20in%20buildings.pdf>>. Acesso: 22/06/2016.

BÉRENGIER, Michel. GARAI, Massimo. **In situ sound absorption coefficient measurement of Various surfaces**. PACS REFERENCES: 43.20.EI, 43.20.Ye, 43.55.Ev, 43.58.Bh, In: Forum Acousticum. 2002.

CABRAL, Matheus Roberto *et al.* **Study Of The Potential Use Of The Sugarcane Bagasse In Cement-Panels**. 10th International Conference on Composite Science and Technology, 2015.

CORNACCHIA, Gianni Maria Machado. **Investigação in-situ do isolamento sonoro ao ruído de Impacto em edifícios residenciais**. Dissertação. Mestrado em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/92430/268349.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso: 22/06/2016.

GUIDORZI, Paolo; GARAI, Massimo. **Advancements in Sound Reflection and Airborne Sound Insulation Measurement on Noise Barriers**. *Open Journal of Acoustics*, 2013, 3, 25-38. 2013.

\_\_\_\_\_. **Signal analysis in the sound absorption measurement procedure: The importance of time subtraction and reference surface corrections**. *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 123, n. 5, p. 3200-3200, 2008.

IWAKIRI, Setsuo *et al.* **Avaliação do Potencial da Madeira de *Schizolobium Amazonicum* “PARICÁ” e *Cecropia hololeuca* “EMBAÚBA” para Produção de Painéis Cimento-Madeira**. *Cerne*, Lavras, v. 18, n. 2, p. 303-308, abr./jun. 2012.

KUIPERS, Erwin R. *et al.* **A numerical study of a method for measuring the effective in situ sound absorption coefficient**. *Acoustical Society of America*. PACS numbers: 43.55.Ev, 43.55.Dt, 43.20.El, 43.20.Ye [NX], 2012.

MACÊDO, Alcebíades Negrão *et al.* **Chapas de cimento-madeira com resíduos da indústria madeireira da Região Amazônica**. *CEP*, v. 66075, p. 110, 2012.

MARCHESAN, Raquel. **Rendimento E Qualidade De Madeira Serrada De Três Espécies Tropicais**. 2012. 94 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2012. Disponível em: <[http://www.floresta.ufpr.br/defesas/pdf\\_ms/2012/d592\\_0826-M.pdf](http://www.floresta.ufpr.br/defesas/pdf_ms/2012/d592_0826-M.pdf)> Acesso: 22/06/2016.

MASSARANI, Paulo M. **Análise Tempo-Frequência de Ensaios *In Situ* de Reflexão Sonora**. 2001. 161 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2001.

NA, Bin *et al.* **Wood–cement compatibility review**. *Wood Research*, v. 59, p. 813-825, 2014.

NAVA, Gabriel Pablo *et al.* **On the in situ estimation of surface acoustic impedance in interiors of arbitrary shape by acoustical inverse methods**. *Acoustical Society of Japan*. *Acoust. Sci. and Tech.* 30, 2 (2009), 2009.

RIBAS, Rovadavia A. J. **Método para avaliação do desempenho térmico e acústico de edificações aplicado em painéis de fechamento industrializados.** Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. 2013. Disponível em: <[http://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/4383/1/TESE\\_M%c3%a9todoAvalia%c3%a7%c3%a3oDesempenho.pdf](http://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/4383/1/TESE_M%c3%a9todoAvalia%c3%a7%c3%a3oDesempenho.pdf)> Acesso: 22/06/2016.

ROBINSON, Philip; XIANG, Ning. **On the subtraction method for *in-situ* reflection and diffusion coefficient measurements.** Acoustical Society of America. PACS numbers: 43.58.Bh, 43.58.Vb, 43.55.Ev [MS], 2010.

RONQUIM, Renato Marini *et al.* **Physical and Mechanical Properties of Wood-Cement Composite with Lignocellulosic Grading Waste Variation.** 2014. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/269960303\\_Physical\\_and\\_Mechanical\\_Properties\\_of\\_Wood-Cement\\_Composite\\_with\\_Lignocellulosic\\_Grading\\_Waste\\_Variation](https://www.researchgate.net/publication/269960303_Physical_and_Mechanical_Properties_of_Wood-Cement_Composite_with_Lignocellulosic_Grading_Waste_Variation)> Acesso: 22/06/2016.

SERWAY, Raymond A. **Física para Cientistas e Engenheiros.** Tradução EZ2 Translate. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

WIJNANT, Y. H. *et al.* **Development and application of a new method for the in situ measurement of sound absorption.** University of Twente, Faculty of Engineering Technology. Structural Dynamics and Acoustics, The Netherlands, 2010.

## 5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentados dois artigos, os quais trouxeram resultados sobre a eficiência térmica e acústica de material cimentício, produzido com aproveitamento de resíduos da indústria madeireira existentes na região de Porto Velho. Buscou-se localizar e identificar o tipo de material descartado no desdobro da madeira em toros.

Constatou-se que, nos teores e granulometria dos resíduos adotados para a pesquisa atual, a incompatibilidade clássica entre as matérias primas ainda permanece. A opção para sanar tal problema foi a utilização de 10 % de metacaulinita e 5 % de  $\text{Ca(OH)}_2$ , ficando comprovada a sua eficiência, quando a resistência inicial esperada do compósito foi restabelecida. Como estes componentes foram adicionados em substituição a frações em massa do cimento, houve também uma redução do consumo de cimento em 15%.

O material resultante teve uma redução na massa específica em cerca de 19 %, comparando-se com o material convencional. Por outro lado, ocasionou redução na resistência a compressão em aproximadamente 15% para os menores teores de adição.

O primeiro artigo mostrou desempenho térmico com melhores resultados para o compósito produzido com teores de 7,5% de resíduos, reduzindo a temperatura entre as faces para cerca de 29 %, em média. Nos demais teores obtiveram-se resultados menos significativos. A massa de resíduos adicionados junto com os vazios resultantes nos compósitos contribuíram para reduzir a condutividade térmica.

No segundo trabalho, para o desempenho acústico foram produzidos painéis de cimento-madeira com teores de resíduos em 0,0%, 2,5%, 5,0% e 7,5%. Também foram aplicados nestes painéis os teores de 10% e 5% de metacaulinita e hidróxido de cálcio, respectivamente.

O melhor desempenho acústico do material mostrou-se dependente de vários fatores, incluindo a frequência do impulso sonoro incidente e as características físicas do material.

Os resultados mais satisfatórios foram verificados para as frequências entre 1600 Hz e 3150 Hz, para painéis com área útil de 1 m<sup>2</sup> e espessura de 15 mm. Nesta faixa de frequências, obteve-se cerca de 50% para o coeficiente de absorção no painel com 7,5% de resíduos, contra aproximadamente 40% do painel de referência.

Em trabalhos futuros recomenda-se realizar os experimentos com maiores dimensões das amostras sob testes, o que melhora a precisão dos resultados. O aumento da espessura e teores mais elevados de resíduos, com melhor compactação dos painéis, também poderiam ser submetidos a avaliação em novas pesquisas. Um outro parâmetro a ser considerado é a avaliação do desempenho dos painéis montados em dispositivo de fechamento em dupla camada com vazios intermediários.

## 6. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575-4: **Edificações habitacionais — Desempenho Parte 4: Sistemas de vedações verticais internas e externas**. Rio de Janeiro ABNT, 2013. 5p.

CABRAL, Matheus Roberto *et al.* **Study Of The Potential Use Of The Sugarcane Bagasse In Cement-Panels**. 10th International Conference on Composite Science and Technology, 2015.

FAN Mizi *et al.* **Cement-bonded composites made from tropical woods: Compatibility of wood and cement**. *Construction and Building Materials* 36 (2012) 135–140, 2012.

LIMA, Adauto José Miranda de. **Utilização de resíduos da madeira de *pinus* spp. Como substituição ao agregado miúdo na produção de blocos de concreto para alvenaria estrutural**. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 24, n. 1, p. 223-235, jan.-mar., 2014.

MARCHESAN, Raquel. **Rendimento E Qualidade De Madeira Serrada De Três Espécies Tropicais**. 2012. 94 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2012. Disponível em: <[http://www.floresta.ufpr.br/defesas/pdf\\_ms/2012/d592\\_0826-M.pdf](http://www.floresta.ufpr.br/defesas/pdf_ms/2012/d592_0826-M.pdf)> Acesso: 22/06/2016.

MEDINA, Engles Apaza. **Pozolanicidade do metacaulim em sistemas binários com cimento Portland e hidróxido de cálcio**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-12032012-120653/pt-br.php>> Acesso: 22/06/2016.

RIBAS, Rovadavia A. J. **Método para avaliação do desempenho térmico e acústico de edificações aplicado em painéis de fechamento industrializados**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. 2013. Disponível em: <

[http://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/4383/1/TESE\\_M%c3%a9todoAvalia%c3%a7%c3%a3oDesempenho.pdf](http://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/4383/1/TESE_M%c3%a9todoAvalia%c3%a7%c3%a3oDesempenho.pdf) > Acesso: 22/06/2016.