



**SYLVIA THAIS MARTINS CARVALHO**

**PROPRIEDADES TÉRMICAS DO PAINEL  
AGLOMERADO DE BAGAÇO DE CANA-DE-  
AÇÚCAR (*Saccharum officinarum* L.)**

**LAVRAS – MG**

**2012**

**SYLVIA THAIS MARTINS CARVALHO**

**PROPRIEDADES TÉRMICAS DO PAINEL AGLOMERADO DE  
BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR (*Saccharum officinarum* L.)**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração em Processamento e Utilização da Madeira, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador

Dr. Lourival Marin Mendes

Coorientadores

Dr. Giovanni Francisco Rabelo

Dr. José Reinaldo Moreira da Silva

Dr. Fábio Akira Mori

**LAVRAS - MG**

**2012**

**Ficha Catalográfica Elaborada pela Divisão de Processos Técnicos da  
Biblioteca da UFLA**

Carvalho, Sylvia Thais Martins.

Propriedades térmicas do painel aglomerado de bagaço de cana-  
de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) / Sylvia Thais Martins  
Carvalho. – Lavras : UFLA, 2012.

73 p.: il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2012.

Orientador: Lourival Marin Mendes.

Bibliografia.

1. Fluxo de calor. 2. Convecção livre. 3. Conforto térmico. I.  
Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 674.836

**SYLVIA THAIS MARTINS CARVALHO**

**PROPRIEDADES TÉRMICAS DO PAINEL AGLOMERADO DE  
BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR (*Saccharum officinarum* L.)**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração em Processamento e Utilização da Madeira, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 28 de fevereiro de 2012.

Dr. Tadayuki Yanagi Junior UFLA

Dr. Giovanni Francisco Rabelo UFLA

Dr. Gustavo Henrique Denzin Tonoli UFLA

Dr. Lourival Marin Mendes

Orientador

**LAVRAS – MG**

**2012**

*A imaginação é mais importante que o conhecimento.*

Albert Einstein

Eu diria mais, que a imaginação transcende ao conhecimento. Na verdade, podemos saber muitas coisas porque já existem, estão aí... Porém, nossas vidas ainda estão em curso. E a distância entre o saber e o construir está em nossa capacidade de imaginar, de não nos contentar com o que já sabemos, com o que já vimos ou controlamos, mas, à semelhança de Deus, de nos permitir criar.

*Ao meu marido, Alysson e aos meus filhos, Lucas e Eduardo,*

**Dedico**

## AGRADECIMENTOS

*Ó profundidade da riqueza, tanto da sabedoria, como do conhecimento de Deus! Quão insondáveis são os seus juízos e quão inescrutáveis os seus caminhos! Quem, pois, conheceu a mente do Senhor? Ou quem foi o seu conselheiro? Ou quem primeiro deu a ele para que lhe venha a ser restituído? Porque dele, e por meio dele e para ele são todas as coisas. A ele, pois, a glória eternamente. Amém.*

Romanos 11: 33 a 36

Agradeço a Jesus Cristo, que me permitiu vislumbrar uma pequenina parte das obras e leis criadas por ele.

Agradeço aos meus pais, Idsel e Mafalda, ausentes, que, enquanto aqui estivera, me ensinaram um caminho sobremodo excelente.

Aos meus irmãos, cunhados e sogra que, durante o percurso, me ouviram muito e me incentivaram a prosseguir.

Aos meus colegas de curso, especialmente Jeimy e Amanda, pela amizade compartilhada.

Ao Rodrigo, ao Devanir, do Instituto Presbiteriano Gammon e ao Sr. José “português”, que se desdoblaram na ajuda para a montagem dos experimentos.

Ao meu orientador, professor Lourival, pela generosidade do tema e apoio inquestionável em todos os momentos.

Ao professor Giovanni, pela parceria no uso de equipamentos e prontidão em disponibilizar o laboratório de protótipos.

Ao professor Tadayuki, pela participação, interesse, concessão de equipamentos e paciência, principalmente no final deste processo.

Ao professor José Reinaldo, que me incitou a perguntar sempre: “será mesmo?” “e por que não?”

Ao professor Paulo Trugilho, pela ajuda oportuna na instrumentalização da pesquisa.

Ao professor Gustavo Tonoli, pelas “dicas”, brincadeiras e interesse no alcance do trabalho.

Aos mestrandos e doutorandos Anderson, Leonardo, Lucas e Patrícia, pelo desprendimento em me ajudar nos laboratórios do Departamento de Engenharia.

Aos meus sobrinhos e colegas da UEPAM, pelo esforço em me ajudar a carregar quinze módulos bem pesados.

Aos técnicos dos laboratórios, especialmente ao Sr. Antônio, que, ao “cadastrar meus polegares”, abriu, não apenas a porta do laboratório, mas de um grande companheirismo, demonstrado na simplicidade de seu incentivo.

Ao Jonas, da Fundecc, pela insistência com fornecedores e paciência com a ansiedade da pesquisadora.

Aos funcionários e às secretárias do departamento, que me ajudaram a manter “o carro atrás dos bois”.

Aos amigos Patrícia Paiva e Leandro Malloy, por terem “avalizado” minha iniciativa em fazer pesquisa.

À Universidade Federal de Lavras, ao Departamento de Ciências Florestais e, em especial, ao programa de Ciência e Tecnologia da Madeira, que me concederam a oportunidade deste trabalho.

À Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pela ajuda financeira.

Ao Instituto Presbiteriano Gammon, pela cessão de algumas de suas instalações durante este processo.

Enfim, sou muito grata a todos que, de alguma forma, participaram da construção desta pesquisa que, na verdade, não termina aqui, pois a ciência não conhece divisas.

*Porque desde a antiguidade não se ouviu, nem com ouvidos se percebeu, nem com olhos se viu Deus além de ti, que trabalha para aquele que nele espera.*

Isaías: 64:4

## RESUMO

O bagaço de cana-de-açúcar é o resíduo agrícola mais abundante produzido no Brasil. Problemas ambientais advindos da destinação do resíduo devem ser considerados para a preservação do meio ambiente e a desoneração dos custos de utilização da madeira com a possível substituição pelo bagaço. Este trabalho foi realizado com o objetivo de determinar o fluxo de transferência de calor por convecção livre para os painéis aglomerados de bagaço de cana provenientes da China e compará-los com painéis aglomerados de pinus e de eucalipto. Foram confeccionados e revestidos internamente três módulos de painéis das espécies estudadas. Realizaram-se cinco repetições por espécie. Uma fonte de calor foi gerada dentro dos módulos e as temperaturas medidas com termopares conectados a um coletor de dados. O tempo de ensaio foi de 180 minutos com intervalo de gravação por minuto. Determinaram-se densidade aparente, umidade, temperatura acumulada, taxa de transferência de calor e fluxo de transferência de calor dos painéis. Os resultados mostraram que o fluxo de transferência de calor dos painéis de bagaço de cana foi estatisticamente diferente dos demais. Foram verificadas diferenças estatísticas no comportamento dos painéis em função do aumento da temperatura.

Palavras-chave: Bagaço de cana-de-açúcar. Paineis aglomerados. Conforto térmico. Fluxo de calor. Convecção livre.

## **ABSTRACT**

The sugar cane bagasse is the most abundant agricultural residue produced in Brazil. Environmental problems that came from the residue destination must be considered for the environment preservation and also for the decreasing of the wood using cost with the possible substitution by the bagasse. This research was made with the objective of determining the heat transference flow by free convection to the sugar cane bagasse panels cluster that came from China and compare them to the ones from the pinus and eucalipto panels cluster. Three panel modules of the studied species were made and internally coated. Five repetitions by species were made. A heat source was generated in the modules and the temperatures were measured with k-type thermocouples connected to a data collector. The testing time was of 180 minutes with a recording interval each minute. The apparent density, humidity, accumulated temperature, heat transference rate and heat transference flow of the panels were determined. The results showed that the heat transference flow of the bagasse panels was statistically different from the other ones. These differences between the species of panels in differentiated intervals were observed, in function of increasing the temperature.

**Keywords:** Sugar cane bagasse. Panel cluster. Environmental confort. Heat flow. Free convection.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	12
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	14
<b>2.1</b>	<b>Cana-de-açúcar</b> .....	14
<b>2.2</b>	<b>Bagaço de cana-de-açúcar</b> .....	16
<b>2.2.1</b>	<b>Origem da matéria-prima: o exemplo chinês</b> .....	18
<b>2.3</b>	<b>Painéis aglomerados</b> .....	19
<b>2.4</b>	<b>Fenômenos térmicos</b> .....	21
<b>2.5</b>	<b>Mecanismos de transmissão de calor</b> .....	22
<b>2.5.1</b>	<b>Condução</b> .....	23
<b>2.5.2</b>	<b>Convecção</b> .....	23
<b>2.5.3</b>	<b>Radiação</b> .....	25
<b>2.6</b>	<b>Conforto térmico</b> .....	26
<b>2.7</b>	<b>Sensores de temperatura</b> .....	27
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	29
<b>3.1</b>	<b>Material de estudo</b> .....	29
<b>3.2</b>	<b>Determinação das propriedades físicas de densidade aparente e umidade dos painéis</b> .....	29
<b>3.3</b>	<b>Equipamentos utilizados</b> .....	30
<b>3.4</b>	<b>Montagem do experimento</b> .....	31
<b>3.5</b>	<b>Determinação do tempo de ensaio</b> .....	36
<b>3.6</b>	<b>Procedimentos de coleta de dados</b> .....	37
<b>3.6.1</b>	<b>Medição das temperaturas</b> .....	38
<b>3.6.2</b>	<b>Medição da velocidade do ar</b> .....	39
<b>3.7</b>	<b>Método</b> .....	41
<b>3.7.1</b>	<b>Descrição da modelagem utilizada</b> .....	41
<b>3.8</b>	<b>Análise estatística</b> .....	47
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	48
<b>4.1</b>	<b>Densidade aparente dos painéis</b> .....	48
<b>4.2</b>	<b>Umidade dos painéis</b> .....	48
<b>4.3</b>	<b>Mensuração das temperaturas</b> .....	49
<b>4.4</b>	<b>Fluxo de transferência de calor <math>q''</math> (W/m<sup>2</sup>)</b> .....	54
<b>4.5</b>	<b>Correlação entre propriedades analisadas</b> .....	56
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	59
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	60
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	61
	<b>ANEXOS</b> .....	66

## 1 INTRODUÇÃO

A qualidade do ambiente tem reflexo direto sobre a qualidade de vida e a saúde das pessoas. Projetos que se preocupem com o conforto ambiental nas edificações, sem o uso de meios de aquecimento e resfriamento artificiais, têm aumentado no Brasil e no mundo. A conscientização ambiental surgiu de forma generalizada na década de 1990 e fez com que o homem passasse a usar recursos naturais de maneira mais racional (CORREIA, 2009). Iniciativas voltadas à criação de componentes construtivos eficientes, ecológicos e duráveis conduzem a novos estudos sobre materiais alternativos, que viabilizem um modo de vida sustentável.

O estudo das propriedades térmicas da madeira, assim como de materiais alternativos, como no caso em questão de painéis de partículas lignocelulósicas não madeireiras, visa empregá-los principalmente em estruturas, forros e paredes divisórias nos mais diversos ambientes utilizados pelo homem. Atualmente, a aplicação mais usual deste tipo de painel entre os países que o comercializam industrialmente direciona-se ao mercado moveleiro, configurando-se como a principal matéria-prima entre os tipos de painéis.

Como o uso de painéis se torna cada vez mais frequente em todas as tipologias arquitetônicas, fazem-se necessárias pesquisas que respondam às demandas econômicas, funcionais e ambientais, promovendo a aplicação adequada do material à função que irá desempenhar.

Neste contexto, a construção de uma sociedade sustentável de consumo, os processos produtivos e as atividades de maior impacto sobre o meio ambiente devem ser baseados em princípios ecológicos e na gestão responsável de recursos renováveis. Um destes princípios é o aumento da reutilização, da reciclagem e da recuperação de resíduos, evitando a poluição, o desperdício e, principalmente, a destruição de biomas naturais. Materiais alternativos, que

respondam à elevada pressão dos níveis de consumo urbano, se inserem nesse cenário, de forma a favorecer o desenvolvimento de novas tecnologias ainda não disponibilizadas em nosso país.

Assim, este trabalho foi realizado com o objetivo geral de avaliar as propriedades térmicas do painel aglomerado de bagaço de cana-de-açúcar da espécie *Saccharum officinarum* L. Os objetivos específicos foram:

- a) determinar as propriedades físicas de densidade e umidade dos painéis;
- b) determinar o fluxo de calor do painel aglomerado de bagaço de cana-de-açúcar, pinus e eucalipto;
- c) comparar os resultados entre os painéis das espécies estudadas.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Cana-de-açúcar**

A importância da cana-de-açúcar pode ser atribuída à sua múltipla utilização; dela são produzidos o açúcar, como alimento; o etanol, como combustível e a eletricidade, a partir do seu bagaço. A cana-de-açúcar também é matéria-prima para outros produtos, como alimento animal, insumos para indústria química e farmacêutica, leveduras, polietileno, papéis, plástico biodegradável e painéis aglomerados destinados à indústria de móveis, entre outros.

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, sendo o único país que domina toda a tecnologia de produção e apresenta uma cadeia produtiva bem organizada (VIDAL; SANTOS; SANTOS, 2006). Segundo um estudo realizado por Purohit e Michaelowa (2007) sobre o potencial de geração de bagaço de cana, no ranking dos países produtores, o Brasil está em primeiro lugar, seguido de Índia, China e outros.

Em relação à distribuição da produção da cana no Brasil, pode-se dizer que a região sudeste participa com 70,3% do total, seguida pelas regiões nordeste, com 12,3%; centro-oeste, com 9,6%; sul, com 7,5% e norte, com 0,3%. O estado de São Paulo, por exemplo, responde por 60% da produção de cana-de-açúcar do país (GOLDEMBERG; NIGRO; COELHO, 2008).

De acordo com um estudo de Silva, Garcia e Silva (2010), a principal destinação do bagaço de cana-de-açúcar é a queima, para gerar eletricidade nas indústrias sucroalcooleiras. Apesar do grande potencial de cogeração de energia por parte das indústrias, cerca de 28% do bagaço gerado por elas não são aproveitados.

Contudo, a principal motivação para o uso do bagaço de cana-de-açúcar na manufatura de painéis aglomerados reside no fato da possível substituição desta matéria-prima pela madeira oriunda de florestas plantadas.

O plantio da cana tem muitas vantagens. A cultura é semiperene, pois pode ser colhida sem a necessidade de replantio por cinco a sete safras anuais consecutivas, o que já não ocorre com a madeira, que tem um ciclo de reposição bem mais longo. A demanda por produtos florestais madeireiros não acompanha a produção, gerando um déficit considerável, principalmente para a indústria da construção civil. Um estudo realizado pela Sociedade Brasileira de Silvicultura (PEREIRA, 2003), apontou a necessidade de importação de madeira por parte da indústria brasileira de base florestal, a partir de 2004, como se observa na Figura 1.

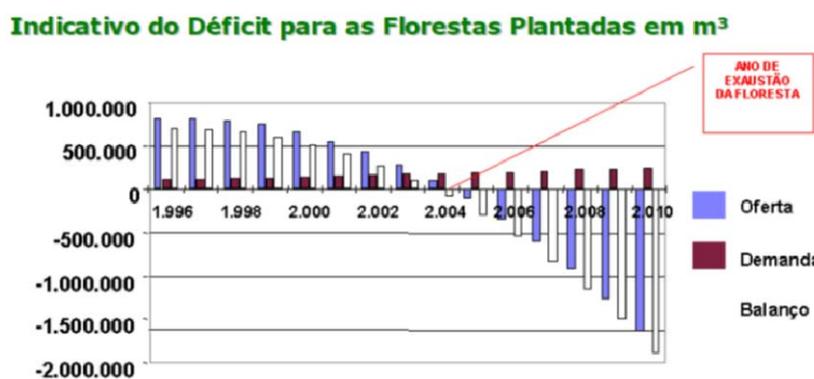


Figura 1 Balanço entre oferta e demanda de madeira oriunda de florestas plantadas

Fonte: Pereira (2003)

A substituição pelo resíduo não atende a todas as áreas de utilização da madeira, mas sua aplicabilidade para a indústria de móveis, divisórias e revestimentos já vem sendo realizada em países fabricantes do aglomerado de bagaço de cana desde 2002 (WU, 2003).

Portanto, a perspectiva de redirecionamento ambiental e econômico de parte do resíduo gerado por esta atividade é promissora para a produção de painéis aglomerados de bagaço de cana. Com a recente expansão do uso do etanol no mundo, a cultura da cana-de-açúcar tende a crescer. A liderança mundial brasileira na produção e no uso economicamente viável de combustíveis renováveis gera uma cadeia de comércio internacional, assegurando uma demanda crescente para o plantio de cana-de-açúcar no país e, conseqüentemente, lucrativa, na medida em que agrega valor a um tipo de resíduo gerado em grande quantidade.

## **2.2 Bagaço de cana-de-açúcar**

O bagaço é um resíduo fibroso lignocelulósico extraído do colmo da cana-de-açúcar nas indústrias sucroalcooleiras. Ele tem características morfológicas (fibras, parênquima, vasos fibrovasculares e células epidérmicas) e químicas similares às da madeira. Segundo o Centro de Tecnologia Canavieira – CTC (2005), a composição química do bagaço de cana-de-açúcar (% base seca) é de: 26% a 47% de celulose, 19% a 33% de hemiceluloses, 14% a 23% de lignina e 1% a 5% dos demais componentes, como finos, terras e solúveis, sendo 60% destes constituídos de sílica.

A composição química média das madeiras mais utilizadas para painéis aglomerados é de  $42\pm 2\%$  de celulose,  $27\pm 2\%$  de hemiceluloses,  $28\pm 2\%$  de lignina,  $5\pm 3\%$  de extrativos para coníferas e de  $45\pm 2\%$  de celulose,  $30\pm 5\%$  de hemiceluloses,  $20\pm 4\%$  de lignina e  $3\pm 2\%$  de extrativos para folhosas (KLOCK et al., 2005).

Cada tonelada de cana produz, em média, 250 kg de bagaço com 50% de umidade e 125 kg de matéria seca (ANDREOLI, 2008). Segundo a Companhia

Nacional de Abastecimento – CONAB (2010), a produção da safra brasileira de cana-de-açúcar 2010/11 foi de 623.905,1, em mil toneladas.

O bagaço de cana se apresenta como o mais promissor resíduo gerado pelas atividades agroindustriais. O clima quente brasileiro, com chuva no verão e inverno seco, propicia ótimas condições para o plantio da cana, fazendo com que a estrutura de fibras se fortaleça durante a fase de crescimento. Apesar de ser o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, o Brasil ainda não utiliza o bagaço para a produção de painéis aglomerados em escala industrial.

O estudo sobre a utilização do bagaço de cana como matéria-prima para gerar produtos com maior valor agregado tem sido feito na Louisiana (WU, 2003). Segundo o autor, os painéis com bagaço oferecem um ótimo potencial como preenchimento de pisos laminados, podendo substituir os painéis de fibra de madeira, de alto custo. A comercialização de painéis e produtos à base de bagaço depende de uma relação custo-benefício no processo de fabricação em escala comercial e o estabelecimento de uma base de mercado para os produtos, o que já é realidade para a empresa *Celotex Corporation of American*, com instalações em vários estados da América do Norte. Esta indústria produz o painel *regular insulation sheathing*, fabricado a partir do bagaço de cana. Ele foi projetado para ser usado como revestimento térmico em paredes internas e subcoberturas (YOUNGQUIST et al., 1996).

A produção de painéis de bagaço de cana na Índia, por exemplo, iniciou-se em 1950, com quatorze unidades instaladas, das quais duas situadas no estado de Maharaehtra começaram produzindo pré-laminados e comercializando seus produtos sob a marca Ecoboard. A maior aplicação destes painéis aglomerados é destinada à indústria de móveis (PANDEY; SUJATHA, 2011).

### 2.2.1 Origem da matéria-prima: o exemplo chinês

Segundo um estudo de Xu et al. (2004), a China possuía cobertura vegetal em 60% de seu território. Com o desmatamento acentuado, entre os anos de 1840 a 1949, ocorreu uma queda neste valor para aproximadamente 8%. A partir da fundação da República Popular da China, em 1949, a situação mudou, principalmente devido a programas e a iniciativas do governo chinês em relação à proteção e à conservação das florestas naturais do país.

Um destes programas foi o *Natural Forest Protection Program* (NFPP), criado em 1998. Após o NFPP, houve uma redução dramática na produção de madeira bruta, entre os anos de 1997 a 2000, gerando uma crise no abastecimento do mercado de produtos florestais. Com o declínio da disponibilidade e o aumento dos preços da madeira *in natura*, cresceu a demanda por sua substituição. As empresas se viram obrigadas a investir em madeiras compensadas e, principalmente, em painéis aglomerados e de fibras.

A China é uma das maiores produtoras e consumidoras de madeiras e painéis de madeira do mundo. Em 2002, a produção de painéis à base de madeira atingiu 23,9 milhões de m<sup>3</sup>, ficando atrás apenas dos Estados Unidos. O consumo doméstico destes painéis em relação às indústrias de móveis e pisos na China atingiu, naquele ano, a marca de 50 milhões de m<sup>3</sup>. A demanda pelo suprimento de madeira e o desequilíbrio entre sua produção, associado ao consumo de painel industrial, resultaram em um desequilíbrio de cerca de 20 milhões m<sup>3</sup>. Devido a esse impacto negativo no setor de produção de madeira, como resultado do NFPP, o governo chinês desenvolveu planos, em 2001, para encorajar a substituição da madeira. A partir de 2001, mais da metade da madeira consumida para a produção de painéis na China passou a ser substituída por outros materiais e, no ano de 2010, houve um aumento significativo em relação à preservação da quantidade de madeira.

O interesse pela substituição foi, particularmente, por resíduos compostos de base agrícola que mantivessem características positivas similares às da madeira. Entre esses resíduos gerados na China, o bagaço de cana aparece em quinto lugar, seguido de palha de trigo, casca de arroz, talo de algodão e palha de milho. O bagaço de cana é utilizado como matéria-prima de alta qualidade para a produção de painéis de média densidade, apresentando, em relação aos outros resíduos, composição química mais próxima à da madeira. Como resultado dos programas de pesquisa intensiva para a substituição da madeira por fibras provenientes de resíduos agrícolas, soluções têm sido implementadas e a indústria de painéis agrícolas está crescendo rapidamente na China. As inovações tecnológicas promovem várias e novas linhas de produção, correspondendo às necessidades de mercado do país neste setor (XU et al., 2004).

### **2.3 Painéis aglomerados**

Os painéis de madeira reconstituída surgiram na Alemanha, em 1818 e, a partir da invenção do torno, foram produzidos em escala industrial. Já no século XX, deu-se início, nos Estados Unidos, à industrialização dos painéis compensados (IWAKIRI, 2005). Em face da dificuldade de obtenção de madeira de boa qualidade, surgiu, na Alemanha, no início da década de 1940, o painel de madeira aglomerada. Após a Segunda Guerra, a indústria de painéis aglomerados se desenvolveu extraordinariamente, em diversas partes do mundo, utilizando não apenas resíduos de madeira, mas também materiais lignocelulósicos, como o bagaço de cana (IWAKIRI, 2005).

O aglomerado começou a ser fabricado no Brasil na segunda metade da década de 1960, quando o grupo francês Louis Dreiffus construiu a primeira fábrica placas do Paraná, em Curitiba. Posteriormente, surgiu a fábrica da

Satipel, em 1970, em Taquari (RS). Pouco depois vieram as fábricas Madeplan e Alplan que, em 1984, foram compradas pela Duratex (MATTOS; GONÇALVES; CHAGAS, 2008).

Com a modernização tecnológica a partir da década de 1990, as empresas brasileiras passaram do processo de prensagem cíclica para prensagem contínua, atribuindo ao produto melhores características de resistência. A modificação da nomenclatura para *medium density particleboard*, ou MDP, ou painel de partículas de média densidade, surgiu dissociando o novo produto do conhecido aglomerado tradicional (MATTOS; GONÇALVES; CHAGAS, 2008).

Segundo Mattos, Gonçalves e Chagas (2008), o aglomerado é uma chapa fabricada com partículas de madeira aglutinadas por meio de resina, com ação de calor e pressão. Como matéria-prima, no mundo, são empregados resíduos industriais de madeira, resíduos da exploração florestal, madeiras de qualidade inferior, não industrializáveis de outra forma, madeiras provenientes de florestas plantadas e reciclagem de madeira sem serventia. No Brasil, a madeira de florestas plantadas, em especial de pinus e de eucalipto, constitui a principal fonte de matéria-prima.

Os painéis de madeira aglomerada são os mais produzidos e consumidos no mundo. Como maiores fabricantes mundiais, destacam-se China (32%) e Estados Unidos (21%), sendo o Brasil o quinto, com pouco mais de 5% do volume fabricado. Como países exportadores responsáveis por 65% das exportações globais, destacam-se China (23%), Malásia (18%), Indonésia (14%) e Brasil (11%) (BIAZUS; HORA; LEITE, 2010).

A indústria brasileira de painéis está projetando um aumento de sua capacidade nominal instalada anual dos 9,2 milhões de m<sup>3</sup>, em 2010, para, aproximadamente, 10,3 milhões m<sup>3</sup>/ano em 2012 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE PAINÉIS DE MADEIRA – ABIPA,

2010). Este crescimento pode estar associado a três principais fatores: a necessidade de substituição da madeira maciça na indústria moveleira e na construção civil em face da escassez de oferta, a evolução tecnológica que permitiu melhor usinagem dos painéis aglomerados e a melhoria da percepção do consumidor final sobre a qualidade do aglomerado. Segundo a Associação Brasileira de Produtos de Florestas Plantadas – ABRAF (2010), as perspectivas são animadoras para este segmento. Aliada à continuidade de alguns projetos de investimentos, observou-se, no fim de 2009, a desoneração tributária do IPI para painéis de madeira industrializada e para móveis, juntamente com a queda dos preços das resinas ureicas e melamínicas, utilizadas na fabricação de painéis.

#### **2.4 Fenômenos térmicos**

A energia total de movimentos dos átomos ou moléculas de um corpo é chamada de energia térmica. Essa energia pode ser transferida de um sistema a outro de duas formas: em virtude da diferença de temperatura entre eles, denominada de calor (quantidade de energia térmica transferida através da fronteira entre os dois sistemas) e em virtude do movimento da fronteira entre os sistemas, denominada de trabalho, que está sempre associado a variações nos volumes dos sistemas em interação (BORGNAKKE; SONNTAG, 2009). O sistema é a quantidade de matéria sobre a qual nossa atenção é dirigida para o estudo. Tudo externo ao sistema é chamado vizinhança ou exterior. Tais sistemas constituem o “volume de controle”, como mostrado na Figura 3.

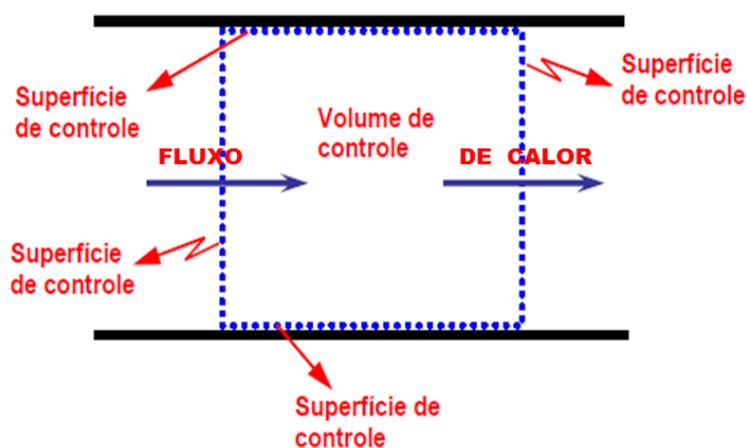


Figura 3 Volume de controle  
 Fonte: Barbosa (2012).

A transferência de energia térmica/calor se dá por processos físicos em função do tempo. A grandeza que estima a quantidade de calor que atravessa uma superfície durante um intervalo de tempo é chamada de fluxo de calor. A transferência de calor ocorre num processo de “desequilíbrio térmico” (CALVÃO, 2007), que é medido pela “taxa de transferência de calor”.

A temperatura é a grandeza que mede o grau de agitação atômica-molecular dos sistemas. Quanto maior o grau de agitação, maior a temperatura; quanto menor for este grau, menor a temperatura. Ela, portanto, permite dizer se dois ou mais sistemas estão ou não em equilíbrio térmico. Todo tipo de matéria está associado a uma determinada temperatura. O calor é a energia térmica em trânsito entre matérias com diferentes temperaturas (CALVÃO, 2007).

## 2.5 Mecanismos de transmissão de calor

O calor, ou energia térmica, é transmitido por duas razões: existência de gradiente de temperatura entre corpos ou mudança de estado físico. A

transferência de calor que ocorre no primeiro caso chama-se “troca seca” e a energia transmitida, “calor sensível”; a transferência de calor que envolve mudança de estado ou fase chama-se “troca úmida” e a energia transmitida, “calor latente”. A fase diz respeito à quantidade de matéria homogênea de uma substância. Fases distintas podem coexistir num mesmo sistema. Em cada fase, a substância pode existir a várias pressões e temperaturas ou, usando a terminologia da termodinâmica, em vários estados; a água, por exemplo, pode estar no estado de vapor e líquido ao mesmo tempo, em determinadas condições. As mudanças de fase podem ocorrer, devido à mudança nas condições de temperatura e pressão, por evaporação, solidificação, condensação e fusão. A transferência de calor por trocas secas pode ocorrer por condução, convecção e radiação (LAMBERTS et al., 2005).

### **2.5.1 Condução**

Na condução, a energia térmica é transmitida de molécula a molécula pela colisão direta das mesmas, havendo, conseqüentemente, necessidade de um meio material. Essa interação molecular ocorre do meio de alta para o meio de baixa temperatura.

A quantidade de calor que flui através de um elemento opaco é função do material que o constitui, da espessura do elemento e do gradiente de temperatura. A grandeza física que caracteriza se um material é melhor ou pior condutor de calor chama-se condutividade térmica ( $k$ ) (LOUREIRO, 2012).

### **2.5.2 Convecção**

É a transmissão de calor que ocorre entre um corpo sólido e um fluido em movimento, podendo o corpo fluido ser líquido ou gasoso. Pode ser

classificada, de acordo com a natureza do escoamento, em convecção forçada, quando o escoamento é forçado por meios externos, tais como bombas, ventiladores e ventos e convecção natural, quando o escoamento é induzido por forças de empuxo, que são originadas por diferenças de densidade causadas por diferença de temperatura no fluido. Na convecção ocorre transporte de massa; as partículas em maior estado de agitação possuem menor densidade (ar quente) e, por isso, sobem, ao passo que as partículas em menor estado de agitação, com maior densidade (ar frio), descem, formando um fluxo de correntes ascendente e descendente. Este fluxo pode ser visualizado na Figura 4. A grandeza física que caracteriza se o processo convectivo é mais ou menos intenso chama-se coeficiente de trocas térmicas por convecção ( $h_c - W/m^2 \cdot ^\circ K$ ) (BARBOSA, 2012).

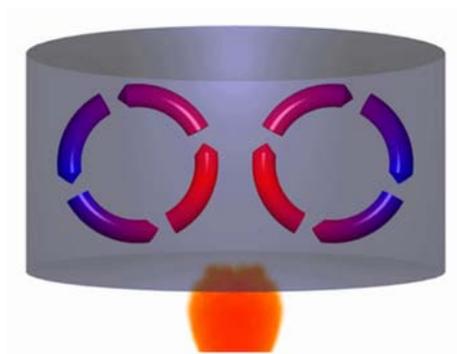


Figura 4 Convecção térmica. As setas vermelhas indicam o movimento ascendente do fluido e as setas azuis indicam o movimento descendente do fluido

Fonte: Dal Moro (2010).

Nas situações em que não existe escoamento forçado do fluido, uma força de corpo atua sobre um fluido no qual existem gradientes de massa específica, devido ao gradiente de temperatura e ao campo gravitacional. O

movimento de um fluido por convecção livre é devido às forças de empuxo no interior do fluido.

Apesar de as taxas de transferência de calor por convecção livre serem menores do que aquelas por convecção forçada, não se deve subestimar este processo, pois a convecção livre fornece maior resistência à transferência de calor e representa um papel importante no projeto ou no desempenho de um sistema. Dentre as várias aplicações existentes, ressalta-se sua atuação nas ciências ambientais, em que é responsável pelos movimentos do oceano e da atmosfera, assim como pelos processos de transferência de calor relacionados (DAL MORO, 2010).

### **2.5.3 Radiação**

Todos os corpos, estando a determinada temperatura acima de 0 K (-273°C), consequentemente possuindo movimento molecular e atômico, emitem radiação eletromagnética.

Fisicamente, a radiação é a emissão de ondas eletromagnéticas geradas dos átomos e moléculas excitadas devido à agitação térmica, que passam para o estado não excitado emitindo fótons. O comprimento de onda destes fótons, como mostrado nas Figuras 5 e 6, é inversamente proporcional à sua temperatura; quanto maior o comprimento de onda, menor a temperatura (BARBOSA, 2012).

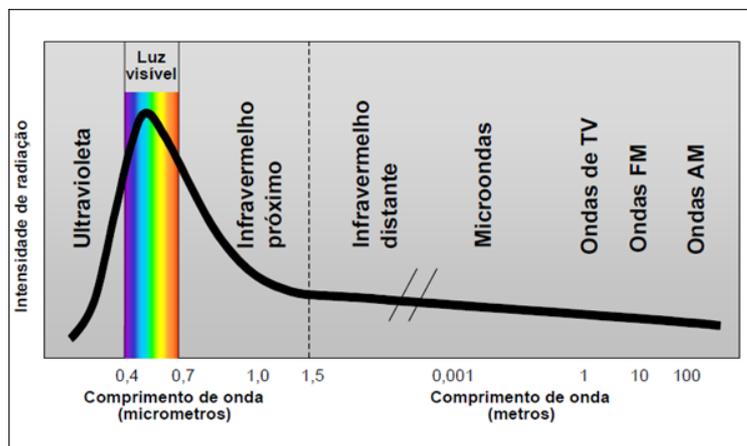


Figura 5 Espectro da radiação solar  
 Fonte: Andrade et al. (2010)

## 2.6 Conforto térmico

Como definido por American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers – ASHRAE (1997), o conforto térmico é um estado de espírito que reflete a satisfação com o ambiente térmico que envolve a pessoa. Se o balanço de todas as trocas de calor a que está submetido o corpo for nulo e a temperatura da pele e o suor estiverem dentro de certos limites, pode-se dizer que o homem sente conforto térmico.

Há uma interação entre as condições climáticas e a edificação na determinação do conforto térmico; como não é possível alterar o clima, devem ser feitos estudos das propriedades dos materiais a serem utilizados, para melhor aplicação dos mesmos. Um projeto arquitetônico, seja para qualquer finalidade, deve prever os fatores que irão influenciar direta ou indiretamente o desempenho térmico da edificação, tais como sua forma e dimensões, orientação, tamanho e número de aberturas, materiais empregados, entre outros. Estes fatores têm como objetivo adequar as condições térmicas interiores em função das

exteriores, por meio de mecanismos de trocas de calor. Tanto a capacidade isolante como a acumulação térmica da estrutura revestem-se de particular importância. Os componentes físicos do ambiente deveriam ser capazes de controlar o fluxo de energia térmica entre o exterior e o interior, mas nem sempre isso ocorre, devido a um desempenho térmico deficiente desses elementos.

Segundo Duarte et al. (2010), os mecanismos de transferência de calor através dos elementos opacos que envolvem as edificações determinam o desempenho térmico das mesmas, conseqüentemente, o consumo energético e o conforto térmico.

Este desempenho pode ser determinado pelas grandezas físicas de seus componentes.

## **2.7 Sensores de temperatura**

De modo geral, os sensores de temperatura podem ser classificados em passivos (autossuficientes), como os termopares e os ativos (modulantes), como os termorresistores (FRUETT, 2010). Segundo Argenta, Zimmermann e Colombo (2004), a temperatura é a segunda grandeza mais medida no mundo, perdendo apenas para o tempo. Por esse motivo, foram muitas as dificuldades em se criar instrumento capaz de medi-la corretamente.

Galileu Galilei é considerado o primeiro inventor de um termômetro, em 1592. Depois dele, vários modelos foram desenvolvidos. Em 1822, o físico Thomas Seebeck descobriu que a junção de dois metais gerava uma tensão elétrica em função da temperatura. O funcionamento dos termopares é baseado neste fenômeno, que é conhecido como Efeito de Seebeck. Dois fios condutores de eletricidade, por exemplo, o cobre e uma liga de cobre-níquel, quando unidos em uma de suas extremidades, geram uma tensão elétrica que pode ser medida

na outra extremidade. A diferença de potencial é proporcional à diferença de temperatura entre suas junções. Embora praticamente se possa construir um termopar com qualquer combinação de dois metais, utilizam-se apenas combinações normalizadas; isto porque possuem tensões de saída previsíveis e suportam grandes gamas de temperatura (ARGENTA; ZIMMERMANN; COLOMBO, 2004).

Os termopares disponíveis no mercado têm os mais diversos formatos, desde os modelos com junção a descoberto, até os modelos que estão incorporados em sondas. Para a escolha de um termopar, deve-se levar em consideração, além da especificação do tipo de liga, a construção física do termopar. Para cada processo é necessária uma construção física externa específica, para possibilitar a mensuração das temperaturas de forma precisa e adequada (FRUETT, 2010).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Material de estudo

Foram utilizados painéis aglomerados industriais de três espécies diferentes: de bagaço de cana-de-açúcar da espécie *Saccharum officinarum* L. e painéis de madeira das espécies *Pinus* sp. e *Eucalyptus* sp., de 15 mm de espessura, conforme mostrado na Figura 7.

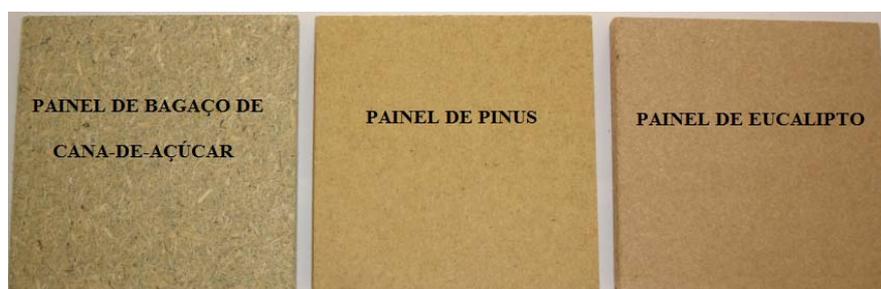


Figura 7 Painéis aglomerados industriais das três espécies em estudo

#### 3.2 Determinação das propriedades físicas de densidade aparente e umidade dos painéis

Para a determinação da densidade, foram retirados 16 corpos de prova, com dimensões de 150 mm de largura e 15 mm de espessura, dos respectivos painéis por espécie, obtendo-se 48 amostras no total. Essas amostras foram acondicionadas em câmara de climatização com umidade relativa de  $65\pm 5\%$  e temperatura de  $20\pm 1$  °C, até apresentarem massa constante. Após serem pesadas em balança de precisão de 0,01g, a densidade aparente foi determinada pela equação

$$Densidade\ aparente = \frac{Massa\ inicial}{volume\ da\ amostra} (g/cm^3)$$

Em seguida, as amostras foram levadas para estufa, à temperatura de 80 °C, para os painéis de pinus e eucalipto e à temperatura de 60 °C, para o painel de bagaço de cana. Após atingirem massa absolutamente seca, foram novamente pesadas e a umidade calculada pela equação

$$Umidade\ (\%) = \frac{massa\ inicial - massa\ seca}{massa\ seca} \times 100$$

Este processo está ilustrado na Figura 8.

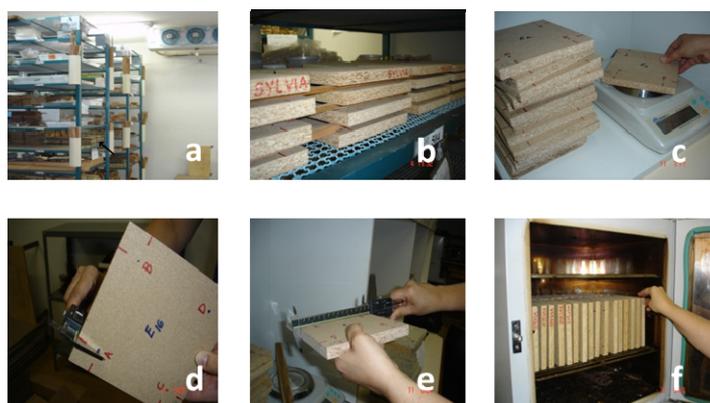


Figura 8 a) Sala de climatização; b) disposição das amostras na preteleira; c) pesagem; d) mensuração da espessura; e) mensuração da lagura; f) secagem em estufa

### 3.3 Equipamentos utilizados

Para a medição das temperaturas, foram utilizados 12 termopares tipo K, sendo 10 de contato e 2 de ambiente. O termopar é constituído por um

termoelemento positivo (KP): Ni90%Cr10% (*Cromel*) e um termoelemento negativo (KN): Ni95%Mn2%Si1%Al12% (*Alumel*); o intervalo de medição da temperatura é de 0 e 1.200 °C).

Para o registro das temperaturas, utilizou-se o equipamento Data Collector, modelo IM DC 100-01E, de fabricação da Yokogawa, com disponibilidade para 20 canais de conexão, dos quais foram utilizados 12. Esse equipamento foi cedido pelo Laboratório de Protótipos do Departamento de Engenharia da UFLA.

Para medir a velocidade do ar, foi utilizado o termoanemômetro de fio quente, modelo 407123, da marca Extech Instruments. Para fotografar a emissão de radiação dos painéis, utilizou-se uma câmera termográfica modelo TI55, da marca Fluke. Ambos os equipamentos foram cedidos pelo Laboratório de Construções e Ambiente do Departamento de Engenharia da UFLA.

Para a vedação dos módulos, foram utilizadas placas de isopor de 15 mm de espessura; manta aluminizada do modelo Freshfoil Premium, constituída de cinco camadas (alumínio/polietileno/reforço/polietileno/alumínio), com reflexão aproximada de 90% e fita adesiva aluminizada, ambas da marca Tégula.

### **3.4 Montagem do experimento**

Foram confeccionados, no laboratório de usinagem do Departamento de Engenharia Florestal da UFLA, cinco módulos cúbicos por espécie, com dimensões de 600 mm de aresta e 15 mm de espessura, com tampas removíveis para a instalação dos equipamentos de mensuração das propriedades e um suporte para apoio dos módulos, conforme Figura 9. Foi aberto um orifício elíptico no fundo dos módulos, com diâmetros de aproximadamente 70 e 40 mm, respectivamente, para a passagem dos fios e equipamentos de mensuração interna de temperatura.



Figura 9 montagem dos módulos; a) corte dos painéis; b) módulo; c) suporte

Os módulos foram revestidos internamente com placa de isopor de 15 mm de espessura. Em seguida, cobriu-se o isopor com uma manta aluminizada, como apresentado na Figura 10. Para a vedação final interna dos módulos, foi utilizada fita aluminizada refletora e um isopor, também revestido, para vedar o orifício de passagem do tripé e dos fios. Apenas as tampas não foram revestidas para receber os sensores de temperatura.



Figura 10 Revestimento dos módulos; a) com isopor e (b, c, d) da manta aluminizada

O experimento foi montado no Laboratório de Protótipos do Departamento de Engenharia da UFLA, posicionado conforme Figura 11.

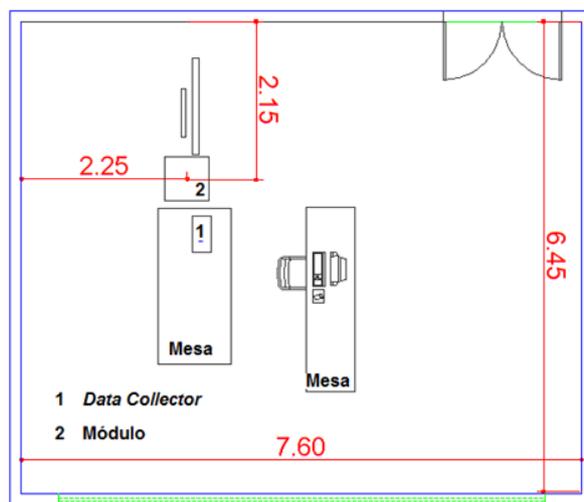


Figura 11 Planta baixa do posicionamento do experimento no laboratório de protótipos da UFLA, sem escala, com medidas em metros

Foi utilizado um tripé com um dispositivo de ferro coberto com fita isolante, contendo duas lâmpadas de 25 W e um termopar tipo K de ambiente (T11), para medir a temperatura da fonte geradora de calor dentro do módulo, posicionado no centro deste, conforme Figura 12.

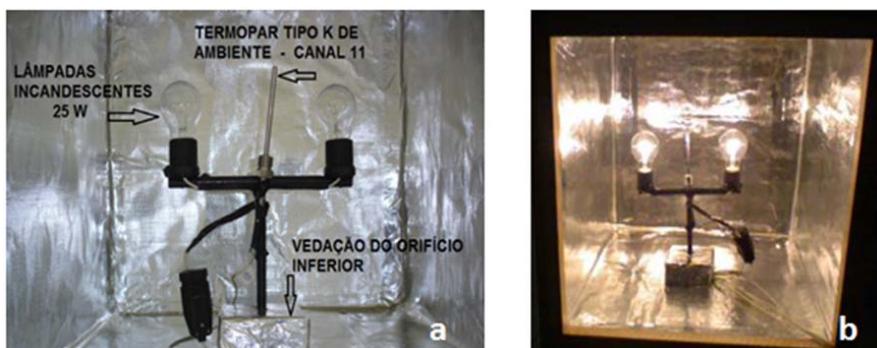


Figura 12 Montagem da fonte geradora de calor e sensor para a medição de temperatura dentro de um módulo

Na tampa lateral do módulo foram posicionados os sensores de temperatura, termopares (tipo K) de contato, acoplados a uma placa lateral com furo para fixação no painel, com parafusos (Figura 13).

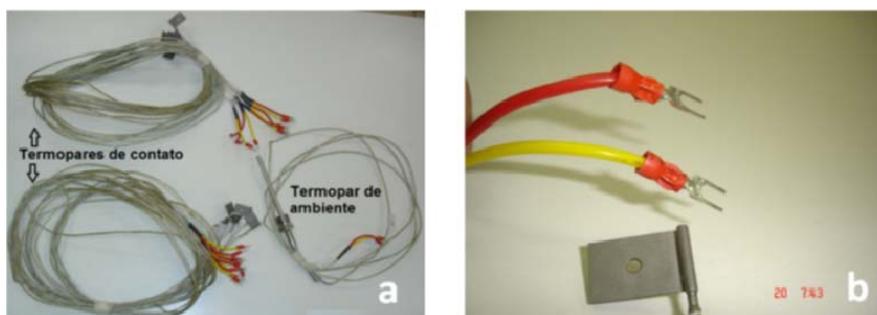


Figura 13 a) Conjunto de termopares; b) detalhe das extremidades do termopar de contato.

As temperaturas foram medidas nas posições ocupadas pelos termopares, obedecendo à correspondência interna/externa, mostradas na Figura 14.

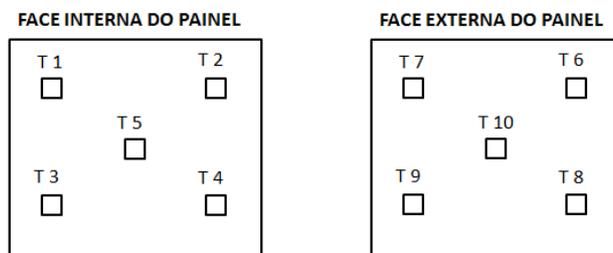


Figura14 Posicionamento dos termopares nas faces interna e externa do painel

A fixação dos termopares foi feita com parafusadeira e parafusos para madeira de 10 mm, para que não atravessasse o painel. O processo de montagem dos termopares é mostrado na Figura 15.



Figura 15 Processo de montagem dos termopares: a) internos; b) detalhe de fixação, c) externos; d) montagem final dos termopares

Os termopares foram devidamente identificados, para facilitar a colocação e a retirada das repetições realizadas por espécie. Foram também conectados aos canais de recepção do aparelho coletor de dados, que recebeu os sinais enviados, converteu e registrou as temperaturas em °C (Figura 16).



Figura 16 Coletor de dados: a) conexão dos termopares nos canais, b) visor frontal do aparelho, mostrando as temperaturas registradas durante o ensaio

### 3.5 Determinação do tempo de ensaio

Para a determinação do tempo de ensaio, foram efetuados testes preliminares com duas lâmpadas incandescentes de 150 W, obtendo-se, com apenas 15 minutos de ensaio, temperatura interna de 90 °C. Testaram-se, então, lâmpadas de 60 W, 40 W e 25 W, que foram escolhidas, pois a temperatura interna se estabilizou abaixo de 50 °C em um tempo de 180 minutos de ensaio, para todos os termopares envolvidos.

Essa escolha se baseou no fato de que os painéis se destinam a ambientes sujeitos a temperaturas abaixo de 50°C, não havendo interesse, neste experimento, por temperaturas superiores a esta.

### 3.6 Procedimentos de coleta de dados

Os ensaios foram realizados nos dias 8, 9, 12, 13, 14, 15, 16, 19 e 20 de dezembro de 2011, no período entre 8h e 12h e de 14h às 18 h.

Foram ensaiados os módulos de bagaço de cana, pinus e eucalipto, com suas respectivas repetições, trocando-se as tampas.

Os dados foram gravados no equipamento Data collector, com intervalo de gravação de um minuto, durante 180 minutos de ensaio para cada repetição.

O dados climatológicos, como pressão do ar (Pa), temperatura (°C) e umidade relativa (%), correspondentes aos dias e horários dos ensaios, foram obtidos na Estação Climatológica do Ministério da Agricultura e do Abastecimento, localizado na UFPA. A tabela com os respectivos valores utilizados para os cálculos das propriedades analisadas estão disponíveis no ANEXO A.

Para os cálculos das propriedades térmicas foram utilizados os valores de condutividade térmica da NBR 15220-2 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, 2005), com valores de densidade aparente, conforme determinado nesta pesquisa para pinus e eucalipto. Como a norma não prevê valores para o aglomerado de bagaço de cana-de-açúcar, a condutividade térmica foi calculada por meio de ensaios de amostras enviadas ao Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, efetuados segundo a norma ASTM C-177. Foi utilizado um modelo de regressão ajustado, de acordo com os dados fornecidos pelo relatório de condutividade térmica (ANEXO B).

### 3.6.1 Medição das temperaturas

Os registros de temperatura foram feitos da seguinte forma: os termopares T1, T2, T3, T4 e T5 correspondem aos termopares de contato internos, com leituras mostradas no visor do equipamento (Figura 17).



Figura 17 Tela de controle dos termopares internos de contato

As temperaturas registradas pelos termopares T6, T7, T8, T9 e T10 correspondem aos termopares de contato externos ao painel (Figura 18).



Figura 18 Tela de controle dos termopares externos de contato

A temperatura registrada pelo T11 corresponde ao termopar de ambiente posicionado entre as lâmpadas geradoras de calor dentro do módulo; a temperatura registrada pelo T12 corresponde ao termopar de ambiente posicionado fora do módulo a 30 cm de distância da tampa e à mesma altura do T11, como mostrado na Figura 19.



Figura 19 Tela de controle dos termopares de ambiente interno (11) e externo (12)

### 3.6.2 Medição da velocidade do ar

Foi utilizado um sensor de velocidade do ar, termoanemômetro de fio quente, para registrar a mudança na velocidade do ar próximo ao painel, durante o ensaio. Estes dados foram utilizados para o cálculo do coeficiente de transferência de calor por convecção. O equipamento foi posicionado em um tripé faceando o painel, sem tocá-lo. Seus valores foram registrados em um visor e anotados durante o ensaio (Figura 20).



Figura 20 a) Posicionamento do aparelho em relação ao painel; b) distância aproximada do painel; c) detalhe do dispositivo que capta a velocidade do ar próxima ao painel; d) leitor de velocidade do ar em (m/s)

Durante os ensaios, foram fotografados os tampos dos módulos com câmera termográfica (Figura 21), para ilustrar a distribuição espacial da temperatura da superfície externa dos painéis.



Figura 21 Foto da câmera termográfica

Todo o processo de montagem se repetiu sucessivamente, quando da substituição das tampas dos módulos das três espécies estudadas.

### 3.7 Método

Este experimento trata da convecção livre do fluido (ar) confinado ao sistema, constituído por um módulo sujeito ao gradiente de temperatura, gerado em seu interior. O objetivo foi determinar o fluxo de calor ( $q''$ ) que atravessa o painel a partir da taxa de transferência de calor ( $q$ ) de superfície plana constituída por tampas de painéis aglomerados das três espécies em estudo.

#### 3.7.1 Descrição da modelagem utilizada

Na convecção livre, as equações que descrevem a transferência de calor originam-se nos princípios de conservação de energia e forças de empuxo mantêm o escoamento.

Relacionando-se as equações apresentadas por ASHRAE (1997), Incropera e Dewitt (1998) e Irvine Junior e Liley (1984), conhecidas pela lei de Fourier e pela equação de resfriamento de Newton, chegou-se à equação que determina a taxa de transferência de calor,  $q$  (W), a seguir,

$$q = \rho \cdot c_p \cdot V \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t} + \frac{T_{int} - T_{ext}}{\frac{e}{k \cdot A} + \frac{1}{h \cdot A}}$$

(1)

em que

$q$ : taxa de transferência de calor (W);

$\rho$ : densidade do ar ( $\text{kg m}^{-3}$ );

$c_p$ : calor específico do ar ( $\text{kJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ );

$V$ : volume de controle ( $\text{m}^3$ );

$\Delta T$ : variação da temperatura ( $^\circ\text{C}$ );

$\Delta t$ : variação do tempo (s);

$T_{\text{int}}$ : temperatura interna média ( $^\circ\text{C}$ );

$T_{\text{ext}}$ : temperatura externa média ( $^\circ\text{C}$ );

$e$ : espessura do painel, igual a 0,015m;

$k$ : condutividade térmica do painel ( $\text{W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{K}^{-1}$ );

$A$ : área de transferência de calor da placa ( $\text{m}^2$ );

$h$ : coeficiente de transferência de calor por convecção ( $\text{W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{k}^{-1}$ ).

Para o cálculo de  $\rho$ , pode-se usar a equação 2 (ALBRIGHT, 1990).

$$\rho = \frac{1}{\left(\frac{R \cdot T}{P}\right) \cdot \left(\frac{1 + 1,6078 \cdot W}{1 + W}\right)}$$

(2)

sendo

$\rho$ : densidade do ar ( $\text{kg m}^{-3}$ );

$R$ : Constante dos gases ( $287,05 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ )

$T$ : temperatura do ar (K);

$P$ : pressão atmosférica do ar ( $\text{N/m}^2$ );

$W$ : Razão de mistura ( $\text{kg kg}^{-1}$ ).

Por sua vez,  $W$  ( $\text{kg kg}^{-1}$ ) pode ser expresso pela equação 3.

$$W = 0,62198 \cdot \frac{P_w}{P - P_w} \quad (3)$$

em que

$p_w$ : pressão atual de vapor ( $\text{N m}^{-2}$ );

Pela equação 4 pode-se determinar  $p_w$ .

$$p_w = \phi \cdot p_{ws} \quad (4)$$

sendo

$\phi$ : umidade relativa do ar (decimal);

$p_{ws}$ : pressão parcial de saturação do ar ( $\text{N m}^{-2}$ ).

De acordo com Albright (1990),  $p_{ws}$  pode ser determinado, para temperaturas do ar entre  $0^\circ\text{C}$  e  $200^\circ\text{C}$ , pela equação 5.

$$\ln(p_{ws}) = \frac{-5,8002206 \cdot 10^3}{T} + 1,3914993 - 48,640239 \cdot 10^{-3} + \quad (5)$$

$$41,764768 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 - 14,452093 \cdot 10^{-9} \cdot T^3 + 6,5459673 \cdot \ln(T)$$

O calor específico do ar ( $c_p$ ) pode ser calculado pela equação 6, para o intervalo de temperatura do ar variando de  $250 \leq T \leq 2000\text{K}$ , com erro de 0,25% (IRVINE JUNIOR; LILEY, 1984).

$$c_p = 1.03409 - 0.2848870 \times 10^{-3} \cdot T + 0.7816818 \times 10^{-6} \cdot T^2 - 0.4970786 \times 10^{-9} \cdot T^3 + 0,1077024 \times 10^{-12} \cdot T^4 \quad (6)$$

O coeficiente de transferência de calor por convecção (h) pode ser determinado pela equação 7.

$$h = \frac{\overline{Nu}_L \cdot K}{L} \quad (7)$$

sendo

$\overline{Nu}_L$  : número de Nussel (adimensional);

L: comprimento da placa (m).

Para convecção livre,  $\overline{Nu}_L$  pode ser determinado pela expressão 8 (ALBRIGHT, 1990).

$$\overline{Nu}_L = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra_L^{1/6}}{\left[ 1 + \left( \frac{0,492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (8)$$

em que

$Ra_L$ : número de Rayleigh (adimensional);

Pr: número de Prandtl (adimensional).

O número de Rayleigh pode ser calculado pela equação 9.

$$Ra_L = Gr_L \cdot Pr = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_{ext}) \cdot L^3}{\nu \cdot \alpha} \quad (9)$$

sendo

$Ra_L$ : número de Rayleigh (adimensional);

$g$ : aceleração da gravidade ( $9,81 \text{ m s}^{-2}$ );

$L$ : comprimento linear de escoamento - vertical ascendente (m);

$T_s$ : temperatura média da superfície ( $^{\circ}\text{C}$ );

$T_{ext}$ : temperatura do ar em condições de corrente livre ( $^{\circ}\text{C}$ );

$\beta$ : coeficiente de expansão volumétrica;

$\alpha$ : difusividade térmica ( $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$ );

$\nu$ : viscosidade cinemática ( $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$ ).

O coeficiente de expansão volumétrica  $\beta$  pode ser calculado pela equação 10.

$$\beta = \frac{1}{T_f} \quad (10)$$

Sendo  $T_f$ : temperatura de filme (K).

A temperatura de filme  $T_f$  é utilizada quando as temperaturas da superfície e do fluido são muito diferentes, sendo a média aritmética entre estas duas (equação 11).

$$T_f = \frac{T_s + T_{ext}}{2} \quad (11)$$

O número de Prandtl expressa a razão entre a difusividade de momento e a difusividade de massa, sendo expressa conforme equação 12.

$$\text{Pr} = \frac{c \cdot \mu}{k} \quad (12)$$

sendo

$\mu$ : a viscosidade dinâmica do ar ( $\text{N s m}^{-2}$ );

$k$ : condutividade térmica do ar ( $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ).

As propriedades térmicas do ar  $\mu$  e  $k$  podem ser determinadas pelas equações 13 e 14, com erros de 1,25% e 0,28%, respectivamente. As equações 13 e 14 podem ser usadas nos intervalos de temperatura de  $250 \leq T \leq 1050\text{K}$  e  $250 \leq T \leq 600\text{K}$ , respectivamente.

$$\mu = -0,98601 + 9,80125 \times 10^{-3} T - 1,17635575 \times 10^{-4} T^2 + 1,2349703 \times 10^{-7} T^3 - 5,7971299 \times 10^{-11} T^4 \quad (13)$$

$$k = -2,27650 \times 10^{-3} + 1,2598485 \times 10^{-4} T - 1,4815235 \times 10^{-7} T^2 + 1,73550646 \times 10^{-10} T^3 - 1,066657 \times 10^{-13} T^4 + 2,47663035 \times 10^{-17} T^5 \quad (14)$$

A propriedade térmica  $\alpha$ , que mede a relação entre a capacidade de o material conduzir energia térmica e a sua capacidade em acumular esta energia, pode ser calculada pela equação 15.

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c_p} \quad (15)$$

A viscosidade cinemática  $\nu$  pode ser calculada pela equação 16.

$$\nu = \mu : \rho \quad (16)$$

Os resultados do fluxo de calor  $q''$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) foram obtidos dividindo-se a taxa de transferência de calor  $q$  ( $\text{W}$ ) calculada para cada espécie pela área da tampa dos respectivos módulos.

### **3.8 Análise estatística**

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, composto por 3 tratamentos (espécies), em esquema fatorial (6 intervalos de tempo de ensaio, sendo 10, 30, 60, 120, 180 minutos e o instante 180min) com 5 repetições por tratamento. O fluxo de calor foi determinado para cada repetição. Para as variáveis densidade aparente e umidade dos painéis, foram realizadas análises de correlação linear de Pearson no software estatístico R.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Densidade aparente dos painéis

No Gráfico 1 observam-se as médias da densidade aparente, seguidas do teste de médias.

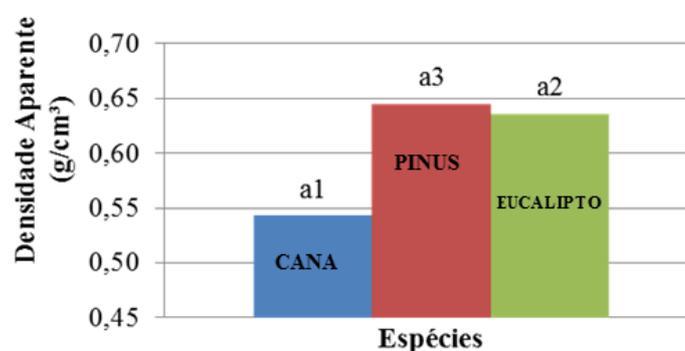


Gráfico 1 Valores médios de densidade aparente dos painéis (g/cm<sup>3</sup>)

Observou-se que o painel de pinus apresentou densidade média de 0,645 g/cm<sup>3</sup>, maior que o eucalipto, com valor de 0,636g/cm<sup>3</sup>. De acordo com a NBR 14810-2 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, 2002), item 5.1.1, os valores médios de densidade para “chapas de madeira aglomerada” devem estar entre 0,551 g/cm<sup>3</sup> e 0,750 g/cm<sup>3</sup>, o que se verificou para ambos os painéis. O painel aglomerado de bagaço de cana apresentou baixa densidade em relação aos aglomerados de madeira, no valor de 0,543 g/cm<sup>3</sup>.

### 4.2 Umidade dos painéis

As médias da umidade dos painéis, seguidas do teste de médias, são mostradas no Gráfico 2.

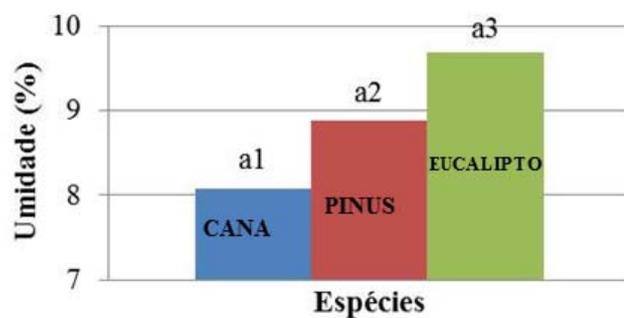


Gráfico 2 Valores médios de umidade dos painéis (%)

Observa-se que o painel de eucalipto apresentou a maior umidade, com estabilização mais elevada que os outros. Seu valor médio foi de 9,93%, seguido pelo pinus, com 9,06%. De acordo com a NBR 14810-2 (ABNT, 2002), item 5.3, os valores médios de umidade para “chapas de madeira aglomerada” devem estar entre 5% e 11%. O painel de bagaço de cana, com valor médio de 8,0%, ficou dentro do intervalo citado pela norma para painéis de madeira, apesar de ter constituição diferente destes.

#### 4.3 Mensuração das temperaturas

Nos Gráficos 3, 4 e 5 observam-se as temperaturas registradas pelos sensores durante o tempo de ensaio correspondente aos painéis de bagaço de cana, pinus e eucalipto, respectivamente.

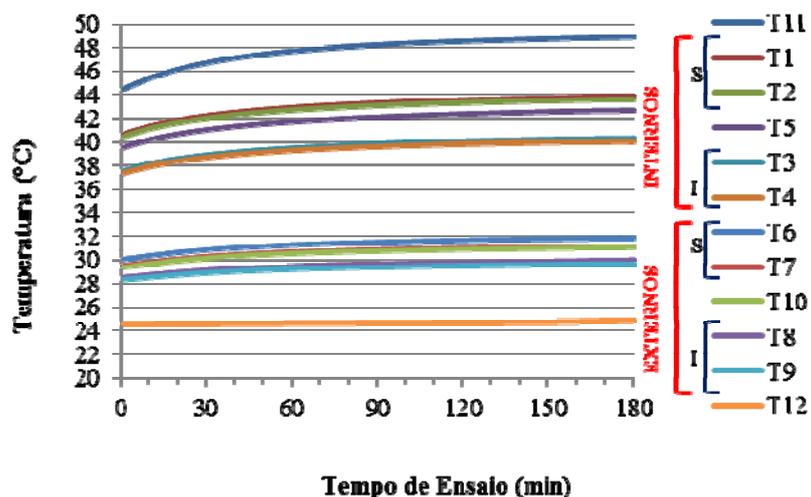


Gráfico 3 Variação da temperatura em função do tempo de ensaio para painel de bagaço de cana. Letra (S) indica os termopares superiores, letra (I) os inferiores. Os conjuntos de termopares internos e externos ao painel estão identificados com chaves vermelhas

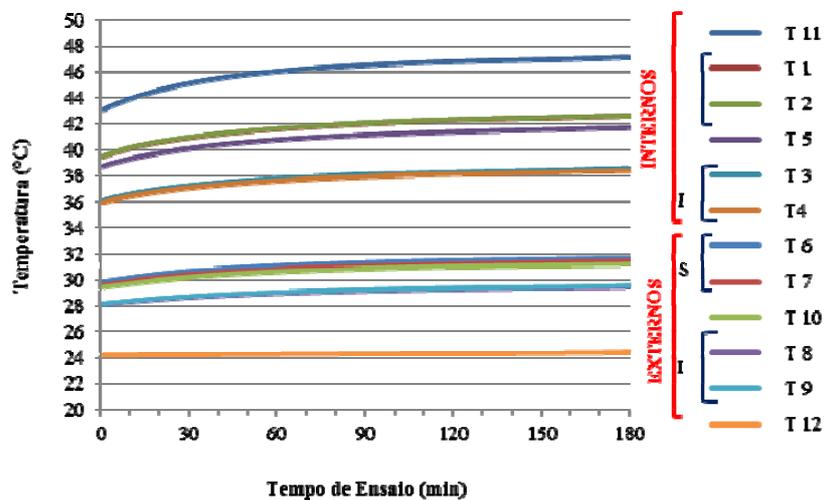


Gráfico 4 Variação da temperatura em função do tempo de ensaio para painel de pinus. Letra (S) indica os termopares superiores, letra (I) os inferiores. Os conjuntos de termopares internos e externos ao painel estão identificados com chaves vermelhas

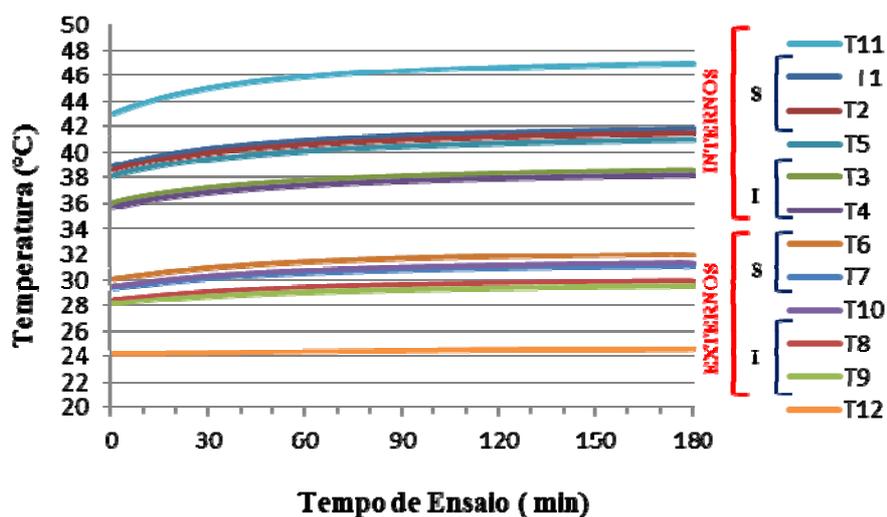


Gráfico 5 Variação da temperatura em função do tempo de ensaio para painel de eucalipto. Letra (S) indica os termopares superiores, letra (I) os inferiores. Os conjuntos de termopares internos e externos ao painel estão identificados com chaves vermelhas

Observou-se, em todas as espécies, uma diferença na intensidade das temperaturas em relação aos sensores distribuídos na área do painel. Os sensores localizados na parte superior do painel (T1, T2, T6 e T7), identificados pela letra (S), registraram valores bem mais altos do que aqueles localizados na parte inferior (T3, T4, T8 e T9), identificados pela letra (I). Os sensores T5 e T10, posicionados no meio do painel, registraram temperaturas médias em relação aos anteriores; o sensor T11 registrou a temperatura do ambiente interno, caracterizando a fonte geradora do calor, mostrando a temperatura mais alta e o sensor T12 registrou a temperatura do ambiente externo ao painel, mostrando a temperatura mais baixa. Este comportamento explica o fenômeno físico da convecção que ocorreu dentro dos módulos, no período de aquecimento promovido pelas lâmpadas acesas. As partículas em maior estado de agitação têm menor densidade (ar quente) e, por isso, sobem, ao passo que as partículas

em menor estado de agitação têm maior densidade (ar frio) e descem, gerando um fluxo de correntes ascendente e descendente (DONOSO, 2007). Este processo pode ser ilustrado na Figura 22, que mostra o gradiente de temperatura por radiação emitida pelos painéis, obtida durante os ensaios.

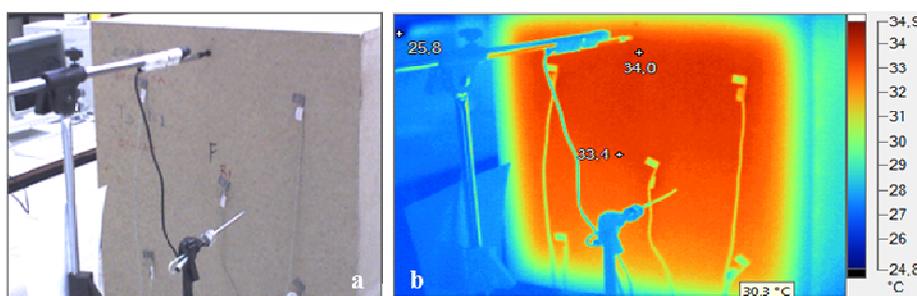


Figura 22 Foto termográfica: a) com alarme de cor desativado; b) com alarme de cor ativado

A parte superior do painel está visivelmente mais aquecida do que a inferior, inclusive com diversos pontos identificados com as respectivas temperaturas.

Observou-se, também, uma diferença na intensidade das temperaturas captadas pelos sensores posicionados nos lados interno (T1, T2, T3, T4 e T5) e externo (T6, T7, T8, T9, T10) do painel, exemplificado nos Gráficos 3, 4 e 5 pelas chaves vermelhas “internas” com temperaturas mais altas e as chaves vermelhas “externas” com temperaturas mais baixas, todas referentes às temperaturas de superfície do painel.

Nos Gráficos 3, 4 e 5, a disposição sequencial dos termopares corresponde à variação gradual decrescente das temperaturas durante o tempo de ensaio. Para o painel de bagaço de cana, o conjunto de termopares internos variou, em média, de 37,4 °C a 43,8 °C e os externos variaram, em média, de 28,3 °C a 31,8 °C, em torno de 10 °C de diferença; para o painel de pinus, o

conjunto de termopares internos variou, em média, de 35,9 °C a 42,6 °C e os externos variaram, em média, de 28,1 °C a 31,6 °C, em torno de 9,4 °C de diferença; para o painel de eucalipto, o conjunto de termopares internos variou, em média, de 35,7 °C a 41,8 °C e os externos variaram, em média, de 28,1 °C a 31,9 °C, em torno de 8,8 °C de diferença entre o interior e o exterior. Estas diferenças podem ser vistas no Gráfico 6.

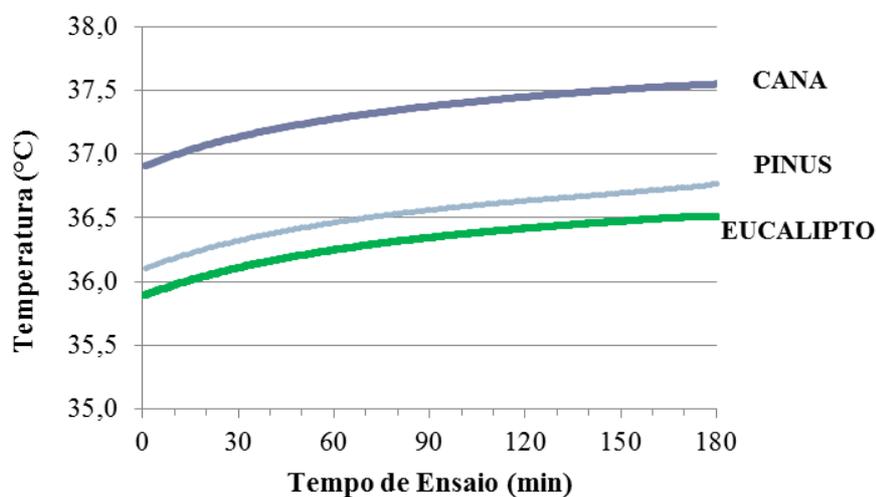


Gráfico 6 Comportamento da temperatura interna média no interior dos módulos por espécie

Verificou-se, portanto, que a temperatura média registrada por todos os sensores no interior do módulo teve um comportamento diferenciado para cada espécie. O painel de bagaço de cana reteve uma quantidade de calor maior que os demais, durante o tempo de ensaio. Pode-se inferir que este comportamento condiz com sua característica de baixa condutividade térmica, oferecendo resistência à passagem do calor.

#### 4.4 Fluxo de transferência de calor $q''$ (W/m<sup>2</sup>)

Os resultados da diferença do fluxo de calor  $q''$  (W/m<sup>2</sup>) entre os painéis das três espécies estudadas podem ser vistos nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 Análise de variância do fluxo de calor dos painéis

<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>QM</b>	<b>Fc</b>	<b>Pr&gt;Fc</b>
Espécie	2	26,344444	11,158 *	0,0001
Tempo	5	1482,437778	627,856	0,0000
Espécie x Tempo	10	6,677778	2,828	0,0051
Erro	72			
CV%	5,94			

FV: fonte de variação; GL: graus de liberdade; QM: quadrado médio  
Teste Scott-Knott. e\*: valor significativo, a 95% de probabilidade

Tabela 2 Valores médios do fluxo de calor  $q''$  (W/m<sup>2</sup>), em função dos intervalos do tempo de ensaio, seguidos do teste de média

Intervalos do tempo de ensaio (minutos)		Espécies dos painéis		
		<b>Bagaço de cana</b>	<b>Pinus</b>	<b>Eucalipto</b>
T1	10	8,60 a1	10,40 a2	11,0 a2
T2	30	18,60 a1	18,40 a1	18,40 a1
T3	60	27,20 a2	24,40 a1	23,40 a1
T4	120	33,60 a2	33,20 a2	31,40 a1
T5	180	35,20 a2	35,00 a2	32,40 a1
T6	Inst.180	35,80 a2	35,00 a2	32,80 a1

Valores na mesma linha, seguidos das letras com mesmos números, não diferem entre si, pelo teste Scott-Knott, a 5% de significância

É possível observar que o fluxo de transferência de calor do painel de bagaço de cana apresentou um comportamento diferenciado no início do ensaio (T1), sendo menor em relação aos demais. Aos 30 minutos de ensaio (T2), os

três tipos de painel apresentaram o mesmo comportamento. No intervalo seguinte (T3), ocorreu uma inversão do comportamento, com valores maiores para o painel de bagaço de cana em relação aos outros. Nos intervalos seguintes, o painel de bagaço de cana e de pinus passaram a se comportar da mesma forma, diferindo do painel de eucalipto, que manteve seus valores sempre abaixo dos demais. Estes comportamentos médios do fluxo de calor para os três tipos de painel estão evidenciados no Gráfico 7, no qual se comparam as três espécies em estudo.

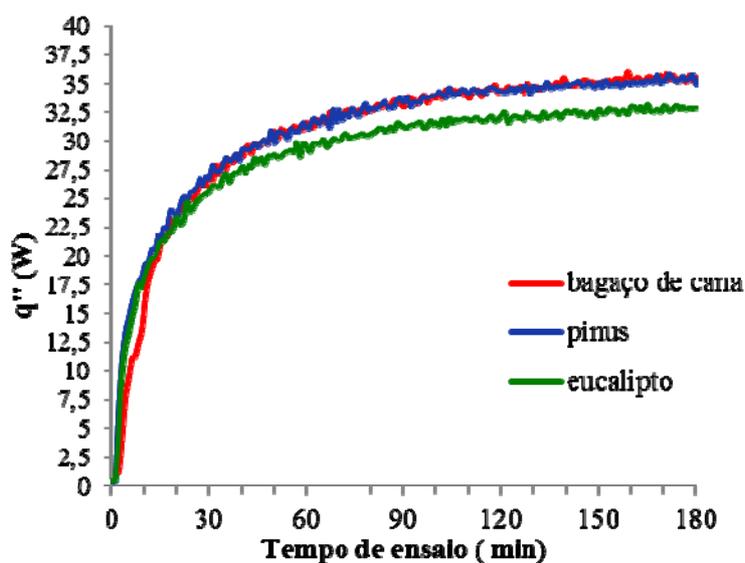


Gráfico 7 Fluxo de calor, em função do tempo de ensaio, por espécie de painel

Embora o painel de pinus tenha apresentado comportamento próximo ao do eucalipto em relação à temperatura interna acumulada (ver gráfico 6), observa-se que, em relação ao fluxo de calor, ocorreu o contrário. Seu comportamento se aproximou do painel de bagaço de cana, apresentando, inclusive, a mesma tendência a partir de 30 minutos de ensaio até a estabilização

da temperatura. Isso sugere a vantagem de substituir o pinus pelo bagaço de cana quanto a possíveis usos para as propriedades analisadas. O comportamento dos painéis ilustrado no Gráfico 7 evidencia as análises do teste de média da Tabela 4, mostrada anteriormente. Observa-se que, a partir de 30 minutos de ensaio, com temperatura variando de 40 °C a 42 °C para o painel de bagaço de cana (Gráfico 3), o fluxo de calor aumenta, superando o painel de eucalipto e se igualando ao de pinus, estatisticamente. Apesar disso, o calor acumulado dentro do módulo de bagaço foi superior aos demais, sendo possível inferir que parte deste calor foi retida pelo painel de bagaço.

Os gráficos que mostram os comportamentos médios do fluxo de calor em função do tempo de ensaio para cada tipo de painel analisado podem ser vistos no ANEXO C.

#### **4.5 Correlação entre propriedades analisadas**

A Tabela com o resumo dos valores médios das propriedades estudadas pode ser visualizada no ANEXO D.

As correlações entre as propriedades não foram significativas. As propriedades de densidade aparente e umidade dos painéis, verificadas neste estudo, não explicam os resultados do comportamento térmico de fluxo de calor, nas condições da temperatura de estudo. Outras variáveis, como as naturezas química e anatômica entre as espécies, assim como variáveis de processamento dos painéis como quantidade e tipo de adesivo utilizado, ciclo de prensagem, temperatura, pressão e tempo na prensa, poderiam ser estudados, a fim de se elucidar se tais diferenças no fluxo de calor dos painéis se correlacionam às propriedades de densidade e umidade.

Entretanto, por se pesquisar painéis industriais, estes dados são desconhecidos e não foi possível inferir qualquer explicação neste sentido.

Porém, sabe-se que bons isolantes térmicos são caracterizados por apresentarem densidades inferiores a  $0,15\text{g/cm}^3$  e baixa condutividade térmica (LABRINCHA; SAMAGAIO; VICENTE, 2006), características panel do bagaço de cana. A condutividade térmica é uma característica do material e varia com a temperatura a que este está submetido. Pode-se verificar que, nos primeiros 30 minutos de ensaio, o comportamento do bagaço se diferenciou dos demais. A partir do aumento da temperatura, seu comportamento sofreu inversão. Pode-se inferir que há condições de temperatura limite para o comportamento isolante do bagaço e também que, acima destas temperaturas, seu comportamento será de maior condução térmica, embora a retenção do calor pelo painel deve ser estudada, pois foi observada neste experimento.

Sabe-se também que a umidade e a temperatura têm relação direta, uma vez que o aumento da temperatura retira umidade do ar, promovendo alterações na passagem ou transmissão do fluxo de calor, podendo ocorrer, além do fenômeno da convecção, outros associados, como evaporação e condensação (LABRINCHA; SAMAGAIO; VICENTE, 2006). Sabe-se que o aumento do fluxo de calor está associado ao aumento de temperatura. Pode-se observar este fenômeno nos gráficos de fluxo de calor x tempo de ensaio, para todas as espécies.

Os valores encontrados para o coeficiente de transmissão de calor por convecção ficaram dentro dos parâmetros estabelecidos na literatura: para gases, entre 2 e  $25\text{ W/m}^2\text{K}$  e, para placa vertical em ar de 0,30 m de altura, com valor médio de  $4,5\text{ W/m}^2\text{K}$  (INCROPERA; DEWITT, 1998). Este coeficiente depende de vários fatores, como a natureza e a velocidade do fluido, a geometria e a rugosidade da superfície sólida, características da camada limite, entre outros.

De maneira geral, o painel de bagaço de cana apresentou respostas de comportamento térmico potencialmente interessantes para se ampliar futuros

estudos de outras propriedades térmicas não contempladas aqui e aplicá-las ao estudo de ambiência.

## 5 CONCLUSÕES

- a) os valores de densidade aparente e umidade dos painéis de pinus e eucalipto encontrados corresponderam aos valores estabelecidos pelas normas. Os valores destas propriedades encontrados para o painel de bagaço de cana ficaram abaixo dos valores dos demais painéis;
- b) o painel de bagaço de cana registrou temperatura interna média acumulada mais elevada que os demais;
- c) durante o intervalo de 180 minutos de ensaio, o painel de eucalipto obteve o menor fluxo de calor;
- d) houve diferença estatística quanto ao fluxo de calor entre as espécies de painéis nos intervalos analisados;
- e) as propriedades de densidade aparente e umidade não apresentaram correlações com o comportamento de fluxo de calor das três espécies de painel aglomerado, na temperatura de estudo.

## **6 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O estudo de propriedades térmicas dos materiais visa melhorar o conforto ambiental e aumentar a eficiência energética das edificações. O estudo de materiais alternativos à utilização da madeira visa minimizar problemas ambientais, como destinação de resíduos, preservação de florestas naturais e melhor emprego dos produtos florestais advindos de florestas plantadas. A junção destes dois tipos de estudo promove a sustentabilidade, conceito tão valorizado em nossos dias.

Neste sentido, ressalta-se a importância desta pesquisa, em que se utilizou um painel gerado com resíduo abundante e de baixo custo no Brasil. Suas potenciais aplicações são grandes, principalmente no setor da construção civil, abrangendo indústrias relacionadas com setor de painéis, moveleiro e de condicionamento térmico de edificações.

Devido às suas características de baixa densidade e condutividade térmica, caracteriza-se como material isolante, podendo ser utilizado em subcoberturas, regularização de pisos, entre paredes duplas, como preenchimento de pisos elevados e divisórias, e com a função de promover a inércia térmica em ambientes que dela necessitem.

Sugere-se a ampliação da pesquisa com relação ao seu comportamento quanto a outras propriedades térmicas.

## REFERÊNCIAS

ALBRIGHT, L. D. **Environment control for animals and plants**. St. Joseph: ASAE, 1990. 453 p.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE handbook: fundamentals**. New York, 1997. 880 p.

ANDRADE, A. G. et al. **Conforto ambiental: fundamento**. USP, 2010. Disponível em: <[http://www.fau.usp.br/cursos/graduacao/arq\\_urbanismo/disciplinas](http://www.fau.usp.br/cursos/graduacao/arq_urbanismo/disciplinas)>. Acesso em: 9 dez. 2011.

ANDREOLI, C. Convergência de agricultura e energia: produção de biomassa celulósica para biocombustíveis e eletricidade. **Economia e Energia**, Belo Horizonte, v. 11, n. 66, 2008. Disponível em: <[http://ecen.com//convergencia\\_de\\_agricultura\\_e\\_energia.htm](http://ecen.com//convergencia_de_agricultura_e_energia.htm)>. Acesso em: 13 jan. 2012.

ARGENTA, F.; ZIMMERMANN, R.; COLOMBO, W. **Termômetro com sensor termopar tipo J**. Caxias do Sul: Fundação Universidade de Caxias do Sul, 2004. 21 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE PAINÉIS DE MADEIRA. **De olho no mercado de painéis**. 2010. Disponível em: <<http://www.abipa.org.br/deOlhoNoMercado.php>>. Acesso em: 14 jan. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-2: desempenho térmico de edificações - parte 2: métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator de ganho solar de elementos e componentes de edificações**. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14810-2**: chapa de madeira aglomerada - parte 2: requisitos. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTOS DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico da ABRAF – ano base 2009**. Brasília, 2010. Disponível em: <<http://www.abraflor.gov.br/estatisticas/ABRAF10-BR/cap02.pdf>>. Acesso em: 14 jan. 2012.

BARBOSA, M. P. **Fenômenos de transporte para bioengenharia**: conceitos básicos. 2012. Disponível em: <<http://www.demec.ufmg.br/disciplinas/ema890/aula1.pdf>>. Acesso em: 12 jan. 2012.

BIAZUS, A.; HORA, A. B.; LEITE, B. G. P. Panorama de mercado: painéis de madeira. **BNDES Setorial 32**, Rio de Janeiro, p. 49-90, 2010. Disponível em: <[http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes\\_pt/Galerias/arquivos/conhecimento/bnset/set32107/pdf](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/arquivos/conhecimento/bnset/set32107/pdf)>. Acesso em: 11 jan. 2012.

BORGNACKE, C.; SONNTAG, R. E. **Fundamentos da termodinâmica**: volume básico. São Paulo: E. Blucher, 2009. 454 p.

CALVÃO, A. O. **Termofísica**: física livre. 2007. Disponível em: <<http://www.fisicalivre.org.TERMOMETRIA>>. Acesso em: 12 jan. 2012.

CENTRO DE TECNOLOGIA CANAVIEIRA. **Sugar cane bagasse and trash. Biomass power generation**. 2005. (Série Caminhos para a sustentabilidade). Disponível em: <<http://www.radarbit.com/site/ctcanavieira.com.br>>. Acesso em: 13 jan. 2012.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira**: cana-de-açúcar, safra 2011/2012, segundo levantamento. 2010. Disponível em: <[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/11\\_01\\_06\\_08\\_41\\_56\\_boletim\\_graos\\_4o\\_lev\\_safra\\_2010\\_2011.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/11_01_06_08_41_56_boletim_graos_4o_lev_safra_2010_2011.pdf)>. Acesso em: 3 jan. 2012.

CORREIA, C. de M. P. **Conforto termo-acústico de uma habitação de baixo custo**. 2009. 95 p. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais)– Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

DAL MORO, G. A. **Processos de transmissão de calor e o efeito estufa**. Universidade Federal do Paraná, 2010. Disponível em: <<http://portaldoprofessor.mec.gov.br/perfil.html?id=124128>>. Acesso em: 24 jan. 2012.

DONOSO, J. P. **Calor, energia e transferência de calor**. São Carlos: USP/IFSC, 2007. 25 p.

DUARTE, D. et al. **Conforto ambiental: fundamentos**. São Paulo: USP, 2010. 41 p.

FRUETT, F. **Sensores térmicos**. Campinas: UNICAMP/FEEC/DSIF, 2010. Disponível em: <<http://www.dsif.fee.unicamp.br/~fabiano/IE012/Notasdeaula/Mecanicos.pdf>>. Acesso em: 23 jan. 2011.

GOLDEMBERG, J.; NIGRO, F. E. B.; COELHO, S. T. **Bioenergia no Estado de São Paulo: situação atual, perspectivas, barreiras e propostas**. São Paulo: Imprensa Oficial do Estado de São Paulo, 2008. 152 p.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1998. 644 p.

IRVINE JUNIOR, T. F.; LILEY, P. E. **Steam and gas tables with computer equations**. Orlando: Academic, 1984. 185 p.

IWAKIRI, S. **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: FUPEF, 2005. 247 p.

KLOCK, U. et al. **Química da madeira**. Curitiba: UFP, 2005. 85 p.

LABRINCHA, J.; SAMAGAIO, A.; VICENTE, R. **Associação para o desenvolvimento da casa do futuro**. Aveiro, Portugal: Universidade de Aveiro, 2006. 64 p.

LAMBERTS, R. et al. **Desempenho térmico de edificações**. Florianópolis: UFSC, 2005. 46 p.

LOUREIRO, E. **Transmissão de calor**. POLI/UPE, 2012. Disponível em: <[http://www.eduloureiro.com.br/index\\_arquivos/taula1.pdf](http://www.eduloureiro.com.br/index_arquivos/taula1.pdf)>. Acesso em: 31 jan. 2012.

MATTOS, R. L. G.; GONÇALVES, R. M.; CHAGAS, F. B. Painéis de madeira no Brasil: panoramas e perspectivas. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 27, p. 121-156, mar. 2008.

PANDEY, C. N.; SUJATHA, D. Crop residues, the alternate raw materials of tomorrow for the preparation of composite board. **IPIRTI**, Tumkur Road, Bangalore, n. 2273, 2011. Disponível em: <[http://icac.org/projects/CommonFund/20\\_ucbvp/papers/06\\_pandey.pdf](http://icac.org/projects/CommonFund/20_ucbvp/papers/06_pandey.pdf)>. Acesso em: 10 jan. 2012.

PEREIRA, M. do C. S. **Produção e consumo de produtos florestais: perspectivas para a região sul com ênfase em Santa Catarina**, Florianópolis. Florianópolis: BRDE/AGFLO/GEPLA, 2003. 51 p.

PUROHIT, P.; MICHAELOWA, A. CDM potential of bagasse cogeneration in India. **Energy Policy**, Surrey, v. 35, p. 4779-4798, May 2007.

SILVA, V. S.; GARCIA, C. de A.; SILVA, C. M. O destino do bagaço da cana-de-açúcar: um estudo a partir das agroindústrias sucroalcooleiras do Paraná. **Revistas em Agronegócios e Meio Ambiente**, Curitiba, v. 3, n. 1, p. 59-76, jan./abr. 2010.

VIDAL, M. de F.; SANTOS, J. A. N.; SANTOS, M. A. **Setor sucroalcooleiro no nordeste brasileiro**: estruturação da cadeia produtiva, produção e mercado. Fortaleza: Sociedade Brasileira de Economia/Sociedade Rural, 2006. Disponível em:  
<[http://www.banconordeste.com/content/aplicacao/etene/artigos/docs/sober\\_sucroalcooleiro.pdf](http://www.banconordeste.com/content/aplicacao/etene/artigos/docs/sober_sucroalcooleiro.pdf)>. Acesso em: 14 jan. 2012.

WU, Q. Particleboard from sugarcane bagasse for value-added applications. **Louisiana Agriculture**, Baton Rouge, v. 46, n. 3, p. 11, 2003.

XU, X. et al. Agri-based composites in China: opportunities and challenges. **Forest Products Journal**, Madison, v. 54, n. 5, p. 8-15, May 2004.

YOUNGQUIST, J. A. et al. **Agricultural fibers for use in building components**. Madison: Forest Products Society, 1996. 170 p.

## ANEXOS

### ANEXO A - Tabela com os dados climatológicos relativos aos dias e horários da realização dos experimentos

Dez / 2011		Pressão ar (Pa)			Temperatura (°C)							Umidade relativa (%)			
Dia	Espécie testada				Ar			Bulbo úmido			Extrema				
		12	18	24	12	18	24	12	18	24	Tx	Tn	12	18	24
08	PR1	92952	-	92738	22,4	-	20,8	20,0	-	19,2	27,2	18,7	80	-	87
09	Pr2	92738	-	92473	19,6	-	20,6	18,8	-	20,0	22,0	18,6	93	-	95
12*	PR3/PR4	92748	-	92677	22,0	-	21,6	19,4	-	19,4	29,0	16,3	78	-	81
13*	PR5/CR1	92850	-	92626	23,0	-	22,2	20,4	-	19,6	30,1	18,6	79	-	76
14*	CR2	92677	-	92554	23,8	-	21,6	20,8	-	19,8	26,8	18,7	76	-	83
15*	CR3/CR4	92697	-	92473	20,2	-	20,4	19,6	-	20,0	22,4	18,5	94	-	96
16*	CR5/ER1	92605	-	92738	20,2	-	20,2	19,8	-	18,8	25,6	19,3	96	-	87
17*		92789	-	92687	21,6	-	21,2	19,8	-	19,5	27,1	18,0	85	-	84
19	ER2/ER3	92850	-	92860	20,6	-	19,2	19,6	-	18,0	26,2	18,0	91	-	88
20	ER4/ER5	93105	-	92830	24,2	-	22,2	21,0	-	19,4	30,1	17,3	75	-	77

Dados obtidos do Ministério de Agricultura e Abastecimento, unidade da Estação Climatológica da UFLA, janeiro 2012 referentes a dezembro 2011.

Os dados relativos ao horário 18h não foram colhidos nestes dias de dezembro.

Para a coleta de dados, efetuou-se a seguinte sequência: pinus (PR 1, 2, 3, 4 e 5), cana (CR 1,2,3,4 e 5) e eucalipto (ER 1,2,3,4 e 5); PR (pinus repetição); CR (cana repetição); ER (eucalipto repetição). Os valores destacados por cor foram selecionados para a entrada dos dados.

## ANEXO B – Ensaio de condutividade térmica do painel de bagaço de cana-de-açúcar



Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas  
 Depto de Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Santa Catarina  
 88040-900 Florianópolis / SC - Brasil  
 Fone: (48) 3721-7709 Fax: (48) 3721-7615 www.lmpt.ufsc.br

Florianópolis, 08 de novembro de 2011

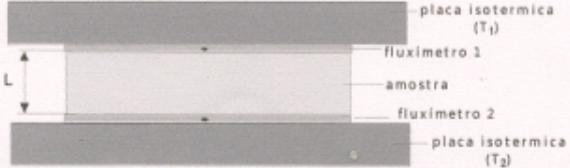
**De:** Saulo Gúths (saulo@Lmpt.ufsc.br)

**Para:** [Sylvia Thais Martins Carvalho](#)

**Assunto:** Relatório ensaios condutividade térmica

Os ensaios de condutividade foram realizados no Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, baseado na Norma Técnica ASTM C-177: "Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus".

A Figura 1 mostra um esquema do dispositivo:



placa isotérmica (T<sub>1</sub>)  
 fluxímetro 1  
 amostra  
 fluxímetro 2  
 placa isotérmica (T<sub>2</sub>)

Figura 1 – Condutímetro Térmico – Método Normalizado

A resistência térmica é determinada a partir da lei de Fourier:

$$R = \frac{T_1 - T_2}{\left(\frac{q}{A}\right)}$$

onde R é a resistência térmica (m<sup>2</sup> K/W), q é o fluxo de calor médio medido pelos fluxímetros 1 e 2 (W) e T<sub>1</sub> e T<sub>2</sub> as temperaturas médias nas superfícies das amostras.

Considerando que a amostra é homogênea, é possível determinar a **condutividade térmica** do material (λ):

$$\lambda = \frac{L}{R}$$

onde λ é a condutividade térmica (W/m K) e L é a espessura da amostra (m).



Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas  
 Depto de Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Santa Catarina  
 88040-900 Florianópolis / SC - Brasil  
 Fone: (48) 3721-7709 Fax: (48) 3721-7615 www.lmpt.ufsc.br

### Valores Ensaio Condutividade Térmica

**Data:** 08/11/2011

**Descrição amostra:** painel aglomerado de bagaço de cana-de-açúcar

**Espessura amostra:** 15.05 mm

Temp Média (°C)	Condutividade Térmica (W/mK)			Condutividade Térmica Média (W/mK)
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	
15	0.1031	0.1038	0.1037	0.104
25	0.1062	0.1064	0.1061	0.106
35	0.1089	0.1086	0.1085	0.109
45	0.1105	0.1107	0.1104	0.111
55	0.1113	0.1118	0.1117	0.112

Diferença de temperatura entre as faces = 10°C

Dimensão amostra = 300 x 300 mm

incerteza estimada: 3 %

Saulo Güths

Saulo Güths (email: saulo@Lmpt.ufsc.br)  
 Departamento de Engenharia Mecânica  
 Universidade Federal de Santa Catarina  
 88040-900 Florianópolis / SC  
 Fone: (48) 3721 7709 R17 cel: (48) 9907 5575



**LMPT**

**Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas**  
 Depto de Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Santa Catarina  
 88040-900 Florianópolis / SC - Brasil  
 Fone: (48) 3721-7709 Fax: (48) 3721-7615 [www.lmpt.ufsc.br](http://www.lmpt.ufsc.br)

---

**OBS:** Em cumprimento às normas da UFSC, esse material somente pode ser utilizado para fins de comprovação e desenvolvimento de produto, não sendo permitido a utilização para fins de propaganda e comerciais, sob qualquer forma ou meio de difusão.

Modelo ajustado de acordo com os dados fornecidos pelo relatório de condutividade térmica do Anexo B.

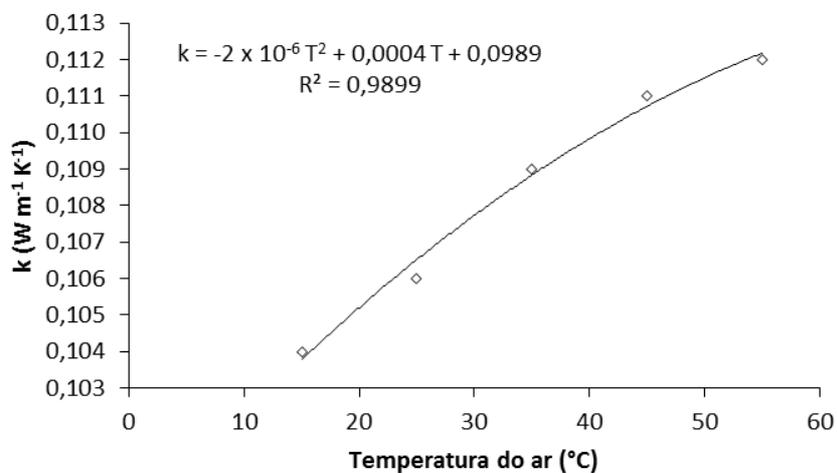


Gráfico 1B Comportamento da condutividade térmica ( $k$ ) de painéis de bagaço de cana, em função da temperatura do ar

ANEXO C – Gráficos do fluxo de calor por tempo de ensaio para cada espécie de painel

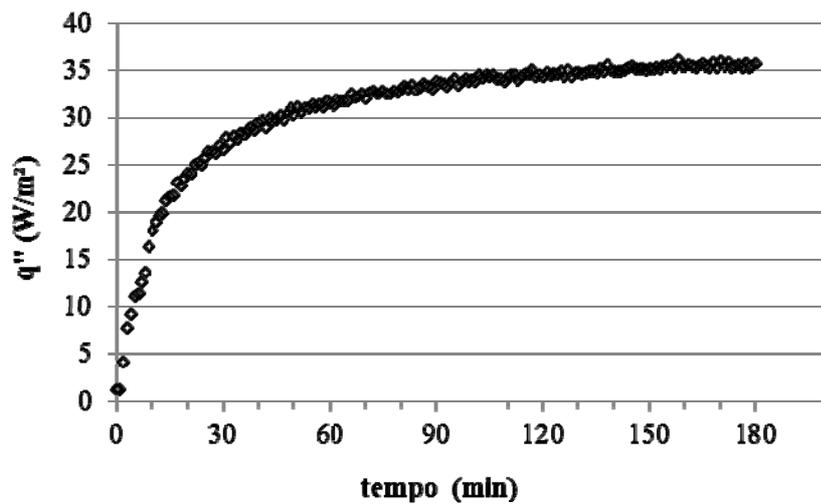


Gráfico 1C Fluxo de transferência de calor para o painel de bagaço de cana

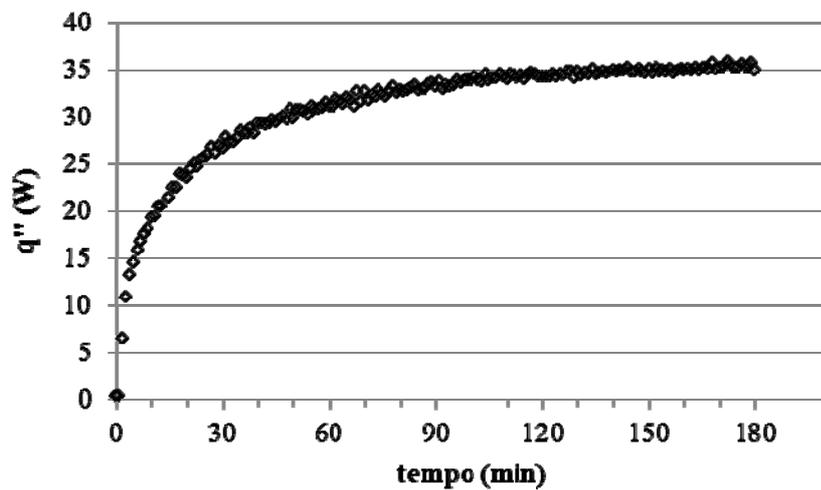


Gráfico 2C Fluxo de transferência de calor para o painel de pinus

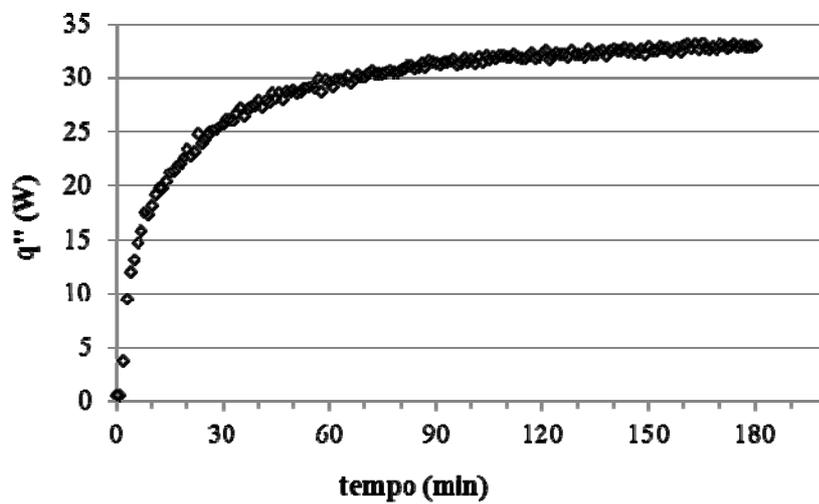


Gráfico 3C: Fluxo de transferência de calor para o painel de eucalipto

O valor máximo de  $q''$  foi de 36,6 W/m<sup>2</sup>; o valor mínimo foi de 1,22 W/m<sup>2</sup>, para o painel de bagaço de cana. O valor máximo de  $q''$  foi de 34,9 W/m<sup>2</sup>; o valor mínimo foi de 0,36 W/m<sup>2</sup>, para o painel de pinus. O valor máximo de  $q''$  foi de 32,8 W/m<sup>2</sup>; o valor mínimo foi de 0,43 W/m<sup>2</sup>, para o painel de eucalipto.

**ANEXO D – Tabela com o resumo dos valores das variáveis em estudo**

Tabela 3 Valores médios das propriedades analisadas por espécie de painel

Propriedades analisadas (valores médios)	Espécies dos painéis		
	Bagaço de cana	Pinus	Eucalipto
Densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> )	0,543	0,645	0,636
Umidade (%)	8,08	8,88	9,69
Condutividade térmica K (W/m.K)	0,10	0,14	0,14
Temperatura acumulada (°C)	42,96	41,65	41,18
Taxa transferência de calor q (W)	9,34	9,02	8,45
Fluxo de calor (W/m <sup>2</sup> )	31,08	31,17	29,17
Coefficiente de convecção natural h (W/m <sup>2</sup> .°K)	4,92	5,07	5,10

### ANEXO E – Análise de variância da densidade e umidade dos painéis

Tabela 4 Análise de variância da densidade aparente dos painéis

<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>QM</b>	<b>Fc</b>	<b>Pr&gt;Fc</b>
Espécie	2	0.051138	542.844*	0.000
Erro	45			
CV%	1.49			

FV: fonte de variação; GL: graus de liberdade; QM: quadrado médio

Teste Scoot-Knott para médias. e\*: valor significativo, a 95% de probabilidade.

Desvio padrão: 0,002

Tabela 5 Análise de variância da umidade dos painéis

<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>QM</b>	<b>Fc</b>	<b>Pr&gt;Fc</b>
Espécie	2	15.062500	115.372*	0.000
Erro	45			
CV%	4.01			

FV: fonte de variação; GL: graus de liberdade; QM: quadrado médio

Teste Scoot-Knott para médias. e\*: valor significativo, a 95% de probabilidade

Desvio padrão: 0,090