



LEONARDO SEIBERT KUHN

**BIOAGREGADOS INTELIGENTES: INCORPORAÇÃO DE
MATERIAIS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA
TERMICA EM PARTÍCULAS LIGNOCELULÓSICAS**

LAVRAS – MG

2024

LEONARDO SEIBERT KUHN

**BIOAGREGADOS INTELIGENTES: INCORPORAÇÃO DE
MATERIAIS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA
TERMICA EM PARTÍCULAS LIGNOCELULÓSICAS**

Tese apresentado à Universidade Federal de Lavras,
como parte das exigências do Programa de Pós-
Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área
de concentração em Ciência e Tecnologia da Madeira,
para obtenção do título de Doutor.

Prof. Dr. Saulo Rocha Ferreira

Orientador

Prof. Dr. Gustavo Henrique Denzin Tonoli

Coorientador

LAVRAS – MG

2024

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Kuhn, Leonardo Seibert.

Bioagregados inteligentes: incorporação de materiais de armazenamento de energia térmica em partículas lignocelulósicas / Leonardo Seibert Kuhn. - 2024.

92 p.

Orientador(a): Saulo Rocha Ferreira.

Coorientador(a): Gustavo Henrique Denzin Tonoli.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2024.

Bibliografia.

1. Material de mudança de fase. 2. Compósito. 3. Madeira. I. Ferreira, Saulo Rocha. II. Denzin Tonoli, Gustavo Henrique. III. Título.

LEONARDO SEIBERT KUHN

**BIOAGREGADOS INTELIGENTES: INCORPORAÇÃO DE MATERIAIS DE
ARMAZENAMENTO DE ENERGIA TERMICA EM PARTÍCULAS
LIGNOCELULÓSICAS**

**SMART BIOAGGREGATES: THERMAL ENERGY STORAGE MATERIALS
INCORPORATED ON LIGNOCELLULOSIC PARTICLES**

Tese apresentado à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração em Ciência e Tecnologia da Madeira, para obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 23 de fevereiro de 2024

Dr. Gustavo Henrique Denzin Tonoli UFLA

Dr. Keoma Defaveri do Carmo e Silva UFLA

Dr. Paulo Roberto Lopes Lima PUC-Rio

Dr. Flávio de Andrade Silva UEFS

Prof. Dr. Saulo Rocha Ferreira
Orientador

Prof. Dr. Gustavo Henrique Denzin Tonoli
Coorientador

**LAVRAS – MG
2024**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente eu agradeço a todos e tudo, e tudo aquilo, muito obrigado!

Agradeço a meus pais Elpidio e Irene, meu irmão Eduardo e minha namorada Daiane e toda a família Piauiense. Agradeço a toda minha família, tios, tias, avós, primos e primas, também a cunhada e familiares.

Agradeço aos amigos de Santo Cristo e Santa Rosa.

Agradeço a Universidade Federal do Pampa onde fiz minha graduação e todos os amigos e professores que pude conhecer.

Agradeço aos amigos e professores da Universidade do Estado de Santa Catarina onde realizei meu mestrado.

Agradeço aos amigos e professores da Universidade Federal de Lavras que proporcionaram a realização dessa tese.

Ao Programa de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira.

Aos órgãos de fomento Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG).

RESUMO

A utilização de material de mudança de fase (PCM, do inglês: *Phase Change Material*) vem ganhando destaque em pesquisas correlacionadas a eficiência energética devido sua capacidade de armazenamento de energia. Nos últimos anos, foram produzidas diversas pesquisas relacionadas ao desenvolvimento e aplicação dos PCM's em diversas áreas como construção civil, sistemas de energia ou aquecimento solar, armazenamento a frio, entre outras. Por meio desse trabalho, objetiva-se desenvolver bio agregados com capacidade de armazenamento de energia térmica. Para isso, foram obtidos os seguintes materiais, partículas de madeiras de Pinus e Paineira, materiais de mudança de fase comercial Crodatherm 24, e óleo de coco com alternativa natural, borrachas de estireno butadieno carboxilada e de acrilonitrilo butadieno carboxilado, e cimento CPV ARI. Para o desenvolvimento do bio agregado a madeira das diferentes espécies foram moídas em moinho de martelo e classificadas com o uso de peneiras para obtenção das partículas. A saturação das partículas foi realizada por imersão no PCM e com utilização de bomba de vácuo. As partículas contendo PCM ou óleo de coco foram revestidas com borracha e areia. Também foram revestidas partículas de madeira sem PCM ou óleo de coco. Por fim, foram produzidos compósitos, um de referência, utilizando se agregado graúdo mineral, nas proporções em massa de 1:2,6:2,7:0,6 para cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e água, respectivamente. Para a substituição dos agregados graúdos por bio agregados foi calculado e substituído o volume do agregado graúdo. Foram avaliados 10 compósitos, para cada espécie foram produzidos compósitos com bio agregados, sendo eles, somente as partículas de madeira, as partículas revestidas, e as partículas contendo PCM ou óleo de coco revestidas. Foi realizado a caracterização dos bio agregados, sendo obtido a densidade, proporção da massa dos materiais constituintes, infravermelho (Espectroscopia Infravermelho de Reflexão Total Atenuada ATR-IR) e imagens. Os compósitos foram submetidos a análise térmica de acordo com a metodologia DKK (dynamische kugel kalorimetrie). Também foi realizado análise mecânica de acordo com EN-196, ensaio de flexão e compressão. Os bio agregados apresentaram aproximadamente 15, 30 e 55% da massa de madeira, PCM e revestimento, respectivamente. Para o traço utilizado na produção dos compósitos, a porcentagem de massa de PCM resultante para as espécies de Paineira e Pinus, respectivamente, foram de 5 e 7%. Por meio da análise térmica os compósitos apresentaram eficiência energética, mantendo a temperatura durante a mudança de estado por aproximadamente 1 hora. Os ensaios mecânicos apresentaram redução da resistência a flexão e compressão em comparação com a referência. Contudo, os bio agregados podem ser utilizados em elementos não estruturais na construção civil, como elementos de vedação e revestimentos argamassados.

Palavras-chave: PCM; Material de mudança de fase; Madeira; Compósito; Concretos leves; Eficiência energética.

ABSTRACT

The use of phase change material (PCM) has been gaining prominence in research related to energy efficiency due to its ability to store energy. In recent years, there has been a great deal of research into the development and application of PCMs in various areas such as civil construction, solar systems, cold storage, among others. The aim of this work is to develop bio-aggregates with thermal energy storage capacity. To this end, the following materials were obtained: Pinus and Paineira wood particles, Crodatherm 24 commercial phase change materials and coconut oil as a natural alternative, carboxylated styrene butadiene and carboxylated acrylonitrile butadiene rubbers, and CPV ARI cement. To develop the bio-aggregate, the wood from the different species was ground in a hammer mill and classified using sieves to obtain the particles. The particles were saturated by immersion in PCM using a vacuum pump. The particles containing PCM or coconut oil were coated with rubber and sand. Wood particles without PCM or coconut oil were also coated. Finally, composites were produced, one as a reference, using only mineral aggregate, in mass proportions of 1:2.6:2.7:0.6 for cement, fine aggregate, coarse aggregate and water, respectively. To evaluate the bio-aggregates, the volume of the coarse aggregate was calculated and replaced. Ten composites were evaluated. For each species, composites with bio-aggregates were produced: wood particles only, coated particles, and particles containing PCM or coconut oil coated. The bio-aggregates were characterized by obtaining the density, mass proportion of the constituent materials, infrared (ATR-IR) and images. The composites were subjected to thermal analysis according to the DKK (dynamische kugel kalorimetrie) methodology. Mechanical analysis was also carried out in accordance with EN-196, flexural and compression tests. The bio-aggregates contained approximately 15, 30 and 55% of the mass of wood, PCM and coating, respectively. The mix used to produce the composites resulted in approximately 5 and 7% PCM mass for the Paineira and Pinus species, respectively. Thermal analysis showed that the composites were energy efficient, maintaining the temperature during the change of state for approximately 1 hour. The mechanical tests showed a reduction in flexural and compressive strength compared to the reference. However, bio-aggregates can be used in non-structural elements in civil construction, such as sealing elements and mortar coatings.

Keywords: PCM; Phase change materials; Wood; Composites; Light weight concrete; Energy efficiency.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	Objetivos.....	14
1.2	Motivação.....	15
1.3	Principais Contribuições.....	15
1.4	Visão geral do trabalho.....	15
2	ESTADO DA ARTE.....	16
2.1	Materiais de mudança de fase.....	16
2.2	Encapsulação.....	18
2.3	Materiais porosos.....	20
2.4	Aplicações dos materiais de mudança de fase.....	26
2.5	Caracterização dos materiais de mudança de fase.....	27
2.6	Caracterização mecânica.....	31
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	33
3.1	Materiais.....	33
3.2	Produção dos Bio agregados.....	34
3.2.1	Processo de Saturação.....	34
3.2.2	Processo de encapsulação.....	36
3.3	Produção dos compósitos.....	37
3.4	Análise de Rendimento, Densidade e Composição.....	39
3.5	Espectroscopia Infravermelho de Reflexão Total Atenuada (ATR-IR).....	40
3.6	Análise térmica.....	40
3.6.1	Análise do PCM e Óleo de coco.....	40
3.6.2	Análise dos Compósitos.....	41
3.7	Análise Mecânica dos Compósitos.....	43

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1	Rendimento, Densidade e Composição	43
4.2	Espectroscopia Infravermelho de Reflexão Total Atenuada (ATR-IR)	47
4.3	Análise térmica	50
4.3.1	Análise do PCM Crodatherm 24 e Óleo de coco.....	50
4.3.2	Análise dos Compósitos a base de cimento.....	52
4.4	Análise mecânica dos Compositos a base de cimento.....	63
5	CONCLUSÃO.....	73
6	REFERÊNCIAS	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Visão geral do trabalho.	16
Figura 2: Classificação dos materiais de mudança de fase.....	17
Figura 3: Exemplos de encapsulação de PCM.	19
Figura 4: Exemplo de materiais porosos utilizados em sistemas de energia térmica.	21
Figure 5: Absorção de PCM pela madeira em função do tempo em 4 condições de pressão (bar).....	26
Figura 6: Resultados da análise FT-IR de SS-PCM para diferentes quantidades de ciclos.	29
Figura 7: Resultados de diferentes taxas de aquecimento da análise de varredura diferencial de calorimetria (DSC).....	30
Figura 8: Partículas de madeira de Pinus e Paineira.....	33
Figure 9: Processo de saturação das partículas com PCM.	35
Figura 10: Processo de encapsulação dos bio agregados.	37
Figura 11: Processo de produção dos compósitos.	39
Figura 12: Esquema dos materiais para análise térmica comparativa do entre Óleo de Coco e PCM (Crodatherm 24).	41
Figura 13: Sistema de análise térmica dos compósitos.	42
Figura 14: Imagem microscópica da secção transversal de bio agregado sem PCM (A) e com PCM (B).....	47
Figura 15: ATR-IR dos materiais utilizados para produção do bioagregado Madeira, PCM e XSBR.....	48
Figura 16: Resultados da análise ATR-IR dos bioagregados produzidos.	49
Figura 17: Resultado da análise térmica do PCM e óleo de coco.	51
Figura 18: Análise térmica dos compósitos com bio agregados com PCM para as madeiras de Pinus e Paineira das amostras durante o aquecimento (A) e resfriamento (B).	53
Figura 19: Análise térmica dos compósitos com bio agregados com PCM para as madeiras de Pinus e Paineira.....	55
Figura 20: Análise térmica dos compósitos com bio agregados contendo PCM e óleo de coco durante aquecimento e resfriamento com madeira de Pinus e Paineira.	57

Figura 21: Avaliação térmica dos diferentes tratamentos somente com partículas de madeira, partículas revestidas com borracha os bio agregados em comparação com o compósito de referência.	58
Figura 22: Resultados da análise térmica para os tratamentos com bio agregados encapsulados com XSBR e XNBR.	60
Figure 23: Imagens do rompimento das amostras dos diferentes compósitos estudados com bio agregados de Paineira após ensaio de tração na flexão.	65
Figure 24: Imagens do rompimento das amostras dos diferentes compósitos estudados com bio agregados de Pinus após ensaio de tração na flexão.	65
Figura 25: Resultados da análise estatística pelo teste de tukey das médias do modulo de ruptura do ensaio de flexão para os diferentes tratamentos.	66
Figura 26: Curvas típicas do ensaio de compressão para os diferentes compósitos.	68
Figura 27: Resultados da análise estatística pelo teste de tukey das médias da tensão máxima do ensaio de compressão para os diferentes compósitos.	69
Figura 28: Imagem microscópicas da interação entre matriz e bio agregados.	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características dos materiais porosos para diferentes materiais.....	22
Tabela 2: Porosidade e densidade da madeira de diferentes espécies.....	23
Tabela 3: Propriedades anatômicas da madeira de diferentes espécies. D lume: Diâmetro do lume; C fibra: Comprimento da fibra; A raio: Altura do raio; L raio: Largura do raio.	23
Tabela 4: Proporção utilizada para produção dos compósitos para cada compósito.	38
Tabela 5: Densidade e porcentagem dos bio agregados produzidos.	44
Tabela 6: Densidade e porcentagem de massa dos materiais dos diferentes compósitos.....	46
Tabela 7: Principais frequências e descrição da análise de ATR-IR.....	50
Tabela 8: Médias, desvio padrão e coeficiente de variação dos resultados das análises de modulo de elasticidade (MOE) e modulo de ruptura (MOR) do ensaio de flexão.	63
Tabela 9: Médias, desvio padrão e coeficiente de variação dos resultados das análises de modulo de elasticidade (MOE) e modulo de ruptura (MOR) do ensaio de compressão.....	67

1 INTRODUÇÃO

Os materiais de mudança de fase (PCM do inglês: *Phase Change Material*) são utilizados para armazenamento de energia térmica, controlando a temperatura do sistema que estão inseridos. Isso ocorre devido a mudança de estado físico do material, como por exemplo, do sólido para o líquido ou o contrário, e para isso o material absorve ou libera energia, sendo esta denominada de calor latente. Esta mudança de fase ocorre em uma ou mais faixas de temperatura, sendo a quantidade de energia e sua temperatura de mudança de fase os dois fatores determinantes para sua aplicação (HUANG, Xiang *et al.*, 2017; MILIÁN *et al.*, 2017; ZALBA *et al.*, 2003).

Devido sua mudança de estado, em especial durante o estado líquido, estes materiais são usualmente encapsulados a fim de evitar perdas por vazamentos, escoamento ou forças capilares. Contudo essa encapsulação deve apresentar algumas características como, ser compatível com o PCM utilizado e o ambiente que será inserido, sendo então necessário que esta encapsulação seja resistente à rupturas, oxidações, tempo de uso, bem como a variação de pressão causada pela alteração volumétrica do material durante os ciclos entre os estados físicos que se encontrarão durante as variações de temperatura (ALAM, T. E. *et al.*, 2015).

A encapsulação também é capaz de proporcionar melhorias no sistema em que o PCM é aplicado. Como a maior condutividade térmica do sistema e melhor aproveitamento do PCM. A condutividade térmica dos materiais está ligada diretamente com a troca de calor do sistema. No caso da construção civil, irá auxiliar na absorção da energia térmica ou liberação da mesma. Outras melhorias estão associada a resistência física e mecânica, e isso levou a utilização de materiais porosos como suporte de PCM (HUANG, Xiubing *et al.*, 2019).

Os materiais porosos podem ser esponjas metálicas, rochas porosas, nanotubos de carbono, aerogeis, entre outros. Esses materiais são capazes de influenciar na resistência mecânica e condutividade térmica do sistema de armazenamento de energia térmica em que estão inseridos. Além disso, as características importantes desses materiais porosos são a porcentagem e dimensões dos poros, densidade e condutividade térmica. Dessa maneira, as características de cada material, PCM, material de encapsulação, material poroso irão influenciar diretamente no sistema de armazenamento de energia térmica, tanto em caráter mecânico quanto térmico (BONACCORSO *et al.*, 2015; HUANG, Xiubing *et al.*, 2019; LI, B. *et al.*, 2015; TANG, Y. *et al.*, 2017; XU, Y. *et al.*, 2017; ZHU, F.; ZHANG, C.; GONG, 2016).

Alguns dos sistemas que utilizam PCM podem ser, sistemas de aquecimento e energia solar, controle térmico de baterias, armazenamento a frio, tecidos termorreguladores e em construções. Na construção civil, a temperatura de fusão dos materiais utilizados está entorno da temperatura de conforto térmico que, a depender da zona bioclimática pode variar entre 18 a 30°C. Esses materiais são utilizados como reguladores de temperatura nos ambientes, reduzindo o consumo de energia elétrica para controle da temperatura (HUANG, Xiang *et al.*, 2019; NAZIR *et al.*, 2019; ZHOU; ZHAO, C. Y.; TIAN, 2012).

A aplicação de PCM's na construção civil pode ser de diversas maneiras. Por meio de nano ou macro capsula contendo PCM, materiais porosos com PCM, ou até mesmo sua aplicação direta em meio ao concreto que também é apresentada na literatura, contudo, esta última pode apresentar vazamentos. Alguns outros exemplos na literatura, é a aplicação em tijolos, paredes e até placas ou tanques dispostos sob o telhado (AKEIBER *et al.*, 2017; NEMATPOUR KESHTELI; SHEIKHOLESLAMI, 2019; SAXENA; RAKSHIT; KAUSHIK, 2019; THAIB; HAMDANI; AMIN, M., 2019).

O uso de materiais porosos para incorporação de PCM se apresenta como uma metodologia eficiente e prática na construção civil. Agregados reciclados como materiais porosos podem ser utilizados para comportar materiais de mudança de fase, estudos apontam bons resultados, apresentaram eficiência energética, resistência mecânica e condutividade térmica (MANKEL; CAGGIANO; KOENDERS, E., 2019). Discorre-se também que, como a madeira é um material poroso e resistente, os materiais de mudança de fase podem ser adsorvidos, um exemplo é com madeira de *Alnus glutinosa* e *Pinus radiata*, as quais já foram submetidas a saturação de PCM (BARRENECHE, C. *et al.*, 2017; VASCO *et al.*, 2018).

A utilização de materiais vegetais em matriz cimentícia já é conhecida. A biomassa tem o objetivo de deixar o concreto mais leve e promover maior flexibilidade ao material cerâmico. Contudo, a vai depender das condições da biomassa inserida na matriz cimentícia. Por exemplo, podem ser utilizadas partículas de madeiras, fibras vegetais e até nano celulose, e as características dessas diferentes biomassas vai afetar nas características do composto final (BOUGUERRA *et al.*, 1999; CAVALCANTE *et al.*, 2008; KARADAE; IRLE; MAHER, 2011; LIN, X. *et al.*, 1994; SANTOS, D. O. J. *et al.*, 2017; SILVEIRA *et al.*, 2019; SUDIN; SWAMY, 2006; USMAN *et al.*, 2018).

No Brasil, as espécies florestais mais comercializadas são do gênero *Pinus* e *Eucaliptus*; contudo, existem uma diversidade enorme de espécies nativas, entre elas existem espécies de baixa densidade com grande potencial para retenção de PCM. Além disso, tem-se a possibilidade de utilização de materiais lignocelulosicos oriundos de resíduos produzidos pela indústria.

De maneira geral, as espécies que possuem maior porosidade podem reter maior quantidade de PCM. A biomassa apresenta uma relação entre a densidade básica e a porosidade inversamente proporcional, quanto menor a densidade maior tende de ser a porosidade. Outro ponto positivo na utilização de materiais vegetais é quanto sua origem, sendo um material renovável, de baixo valor comercial e fácil acessibilidade (DING *et al.*, 2008).

Com isso, o objetivo desse trabalho é desenvolver e avaliar bioagregados com potencial de armazenamento de energia térmica para a construção civil. Foi avaliado o potencial de utilização de partículas de madeira para retenção de material de mudança de fase. Posteriormente foi avaliado a resposta térmica e mecânica dos compósitos contendo os bioagregados com potencial de armazenamento de energia térmica.

1.1 Objetivos

Objetivo geral

- Avaliar a incorporação de bioagregados com capacidade de armazenamento de energia térmica em compósitos cimentícios.

Objetivos específicos

- Avaliar óleo de coco como alternativa de materiais de mudança de fase.
- Aferir a incorporação material de mudança de fase em materiais lignocelulósicos e seu revestimento.
- Observar a influência dos diferentes materiais utilizados para produção dos bioagregados no compósito cimentício.
- Estudar as propriedades térmicas e mecânicas dos compósitos contendo os bio agregados desenvolvidos.

1.2 Motivação

Já é possível encontrar estudos sobre a incorporação de biomassa bem como de materiais de mudança de fase (PCM) na construção civil. Por meio deste trabalho, encontramos a oportunidade de unir essas duas aplicações para desenvolvimento de novas tecnologias, criando um bioagregado funcional, por meio da incorporação de material de mudança de fase na porosidade dos materiais lignocelulósicos, capaz de fornecer eficiência energética com redução da massa final dos materiais e redução final do impacto ambiental de uma edificação (seja pela utilização de um material lignocelulósico bem como pela eficiência energética atribuída ao uso de materiais de armazenamento de energia).

1.3 Principais Contribuições

Por meio desse trabalho espera-se promover os seguintes itens:

- Desenvolvimento de uma nova linha de pesquisa para o programa de pós graduação (PPGCTM) e Universidade Federal de Lavras;
- Formação de recursos humanos capacitada para desenvolvimento de pesquisas no tema de materiais de mudança de fase;
- Incentivar o desenvolvimento de materiais de mudança de fase orgânicos e alternativos;
- Um bioagregado capaz de fornecer armazenamento de energia térmica para a construção civil;

1.4 Visão geral do trabalho

Para o desenvolvimento do trabalho e alcançar os objetivos o trabalho pode ser compreendido da seguinte forma: conforme a Figura 1, para a produção dos bio agregados foi obtido partículas de madeira (Fig 1A), as partículas foram saturadas com PCM (Fig. 1B) e então encapsuladas (Fig. 1C), por fim, os bio agregados foram aplicados em matriz cimentícia (Fig. 1D) para produção dos compósitos.

Figura 1: Visão geral do trabalho.



Legenda: Obtenção de partículas de madeira (A), processo de saturação das partículas com PCM (B), processo de encapsulação das partículas (C) e aplicação dos bio agregado em compósito cimentício (D).

Fonte: Leonardo Seibert Kuhn (2024).

2 ESTADO DA ARTE

2.1 Materiais de mudança de fase

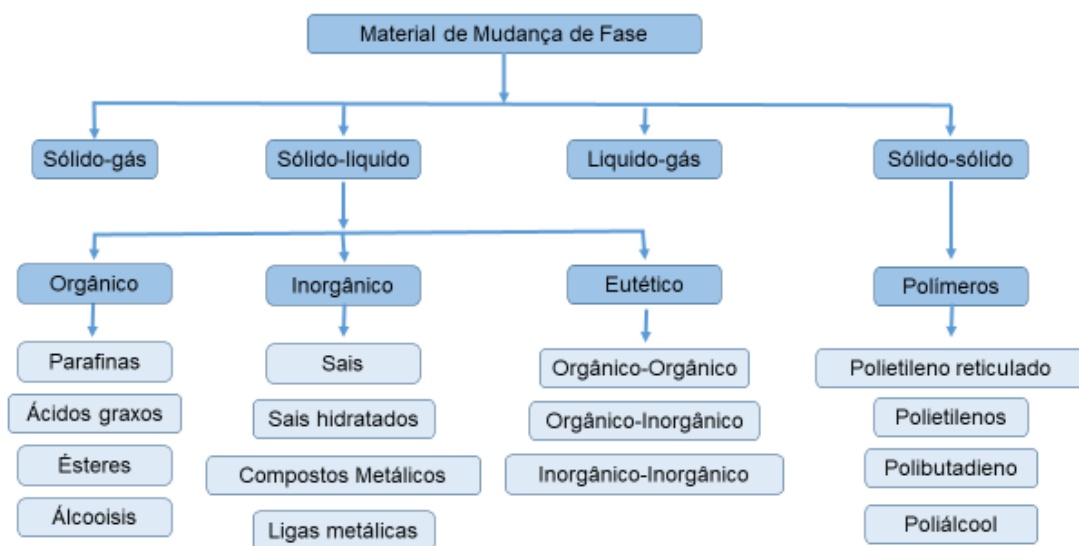
Os materiais de mudança de fase são utilizados para armazenamento de energia térmica. Durante a transição do estado físico, o material pode absorver ou liberar grande quantidade de calor, a quantidade de calor por grama do material é conhecida como calor latente. E a temperatura em que o material muda de estado físico vai ser determinante para sua escolha e aplicação em um sistema de armazenamento de energia térmica (ALAM, T. E. *et al.*, 2015).

A classificação dos PCMs pode ser pelos estados físicos ou por sua origem. Podemos observar a classificação na Figura 2, onde existem 4 mudanças de estados físicos, as mais usadas

são do estado físico sólido para o líquido e sólido para o sólido. Quanto a seu tipo de material, podem ser inorgânicas, orgânicas e misturas eutéticas (NAZIR *et al.*, 2019).

Os PCMs orgânicos podem ser parafinas, ácidos graxos ésteres, álcoois, amidos, açucars, óleos e assim por diante. Os inorgânicos podem ser sais, sais hidratados, compostos metálicos, ligas metálicas sulfatos, nitratos, sulfato de sódio decahidratado, entre outros (NAZIR *et al.*, 2019).

Figura 2: Classificação dos materiais de mudança de fase.



Fonte: (NAZIR *et al.*, 2019)

Algumas vantagens dos PCMs inorgânicos estão associadas aos maiores valores de calor latente, maior condutividade térmica, não inflamável e menor valor comercial. As ligas metálicas podem apresentar temperatura de fusão de 30 a mais de 1000 °C, calor latente de 25 a 90 KJ/Kg e condutividade térmica de 40 W/mK. Quanto aos sais hidratados podem apresentar temperatura de fusão de -30 a 120 °C, calor latente de 85 a 330 KJ/kg e condutividade térmica de 0,7 W/mK. Entretanto eles são mais corrosivos e instáveis e pode apresentar re-solidificação imprópria (GE *et al.*, 2013; KHAN, Zakir; KHAN, Zulfiqar; GHAFOR, 2016; SHARMA, A. *et al.*, 2009).

Quanto aos orgânicos, são mais quimicamente estáveis, não corrosivos, alto calor latente por unidade, recicláveis, e não apresentam necessidade de esfriar muito abaixo da temperatura de solidificação para iniciar sua cristalização. Eles podem apresentar temperatura de fusão de -12 a

180 °C, calor latente de 60 a 270 KJ/Kg e condutividade térmica de aproximadamente 0,2 W/mK (CABEZA, L. F. *et al.*, 2011; RATHOD; BANERJEE, 2013; SOCACIU, 2012).

Contudo, devido a mudança de estado físico desses materiais, eles precisam ser contidos para suas aplicações nos diferentes sistemas de armazenamento de energia térmica. Uma das técnicas é o revestimento ou encapsulação desses materiais, pois quando estão no estado líquido, eles podem vazar ou escoar devido sua fluidez (ALAM, T. E. *et al.*, 2015).

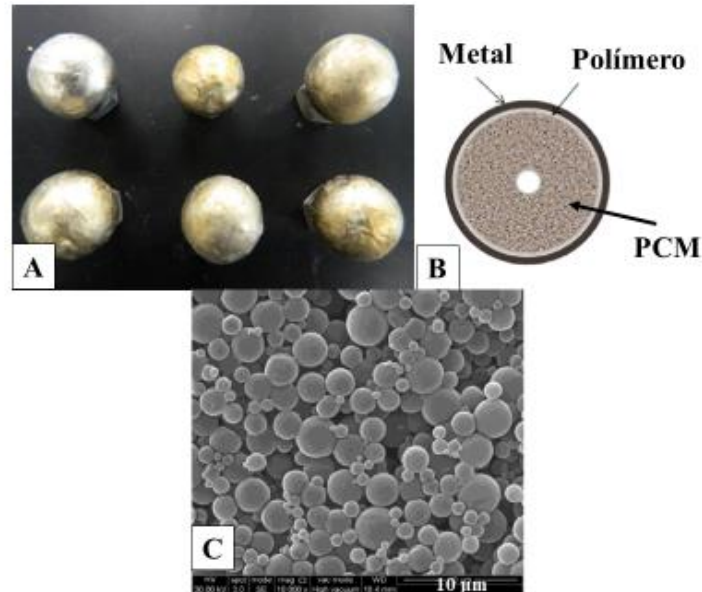
2.2 Encapsulação

A encapsulação consiste em conter o material de mudança de fase em um invólucro. Mantendo-o isolado do sistema e permitindo somente a troca de calor, evitando interações negativas. Estes invólucros, revestimento ou encapsulamentos podem ter diferentes formas, podem se apresentar de forma esférica ou irregular, diversas camadas, núcleos ou uma matriz contínua (ALAM, T. E. *et al.*, 2015; SHI, X. *et al.*, 2014).

Assim como a forma, também pode apresentar diferentes dimensões. As dimensões podem ser classificadas em macro, acima de 1 cm, micro, de 1 cm a 0,1 mm, ou nano, com até 100 μm .

Podemos observar alguns exemplos de macro e microcápsulas na Figura 3. Na fig 3A estão apresentados esferas com 12 a 25 mm de diâmetro, com materiais de encapsulação descritos na fig. 3B, uma camada de polímero e outra de metal. Na Fig. 3C estão apresentados nano capsulas com menos de 10 μm de diâmetro, essas nano capsulas são formadas por parafina como PCM e revestidas por resina melamínica (ALAM, T. E. *et al.*, 2015; LIU, C. *et al.*, 2017).

Figura 3: Exemplos de encapsulação de PCM.



Legenda: Macro capsulas com 12 a 25 mm de diâmetro (A) e materiais descritos em B; Microcápsulas de parafina encapsuladas por resina melamínica (C).

Fonte: A e B (ALAM, T. E. *et al.*, 2015); C (LIU, C. *et al.*, 2017).

Como observado na Figura 3, os materiais de encapsulação também podem ser dos mais variados tipos. Podem ser metais, polímeros, cerâmicas, entre outros. Eles devem resistir à pressão gerada pelo material de mudança de fase em seu interior, a temperatura, reações químicas e apresentar durabilidade (HUANG, Xiang *et al.*, 2019).

Os métodos de encapsulação podem físicos, físico-químicos e químicos. O processo físico se dá por desidratação e adesão; um exemplo é o “Spray drying” onde o material de mudança de fase é aspirado em gotas no material encapsulante e então secado (BORREGUERO *et al.*, 2011).

Os processos físico-químicos são interações entre os dois processos. Um exemplo são os métodos de coacervação e sol-gel, nesses processos são realizadas duas emulsões, uma com o material de núcleo, neste caso o PCM, e outra com o material encapsulante, e por tratamento de reticulação, dissolvatação ou térmico é estabilizado as microcápsulas (BAYÉS-GARCÍA *et al.*, 2010; ZHANG, Huanzhi; WANG, Xiaodong; WU, D., 2010).

Os métodos químicos são os mais utilizados e podem ser por três tipos: de polimerização interfacial, suspensão ou emulsão. Nessas metodologias é produzida uma solução contendo os materiais de núcleo e capsula, e então é adicionado um material para polimerização das capsulas (QIU *et al.*, 2013; SÁNCHEZ, L. *et al.*, 2008; SARI *et al.*, 2014).

Durante a utilização das capsulas de PCM podem ocorrer corrosões e vazamentos. Para corrigir esses problemas alguns pesquisadores mostram que existem algumas técnicas, contudo apresenta ser complicado e não muito efetivo. A melhor alternativa é a boa estabilidade química entre os materiais do sistema de armazenamento de energia térmica promovendo maior durabilidade do sistema (FANG, G. *et al.*, 2009; HÖHLEIN; KÖNIG-HAAGEN; BRÜGGEMANN, 2018).

Os diferentes materiais utilizados como PCM e revestimento, além de suas proporções, irão influenciar nas propriedades térmicas do sistema. Algumas pesquisas buscam melhorar a condutividade e estabilidade térmica desses sistemas. E as características notórias como a baixa condutividade térmica dos materiais orgânicos, e dos materiais inorgânicos podem ter a condutividade térmica até 8x maior (LIU, C. *et al.*, 2017; SAMI; SADRAMELI; ETESAMI, 2018; SARI *et al.*, 2009; YU, S.; WANG, Xiaodong; WU, D., 2014).

Uma forma desenvolvida para melhorar as propriedades térmicas do sistema em que as microcápsulas de material de mudança de fase estão inseridas, é por um meio fluido. As microcápsulas de PCM são inseridas em um meio fluido, e esse líquido irá transferir melhor a temperatura entre as capsulas, por convecção. Esse método é conhecido como lama ou lodo de microcápsulas de material de mudança de fase (PCM slurry) (DUTKOWSKI; FIUK, 2019; FU *et al.*, 2017; PU *et al.*, 2019).

Diversos polímeros são utilizados para encapsulação de PCM, além disso polímeros também são utilizados em compósitos cimentícios. São capazes de melhorar as ligações entre biomassa e matriz cimentícia, promovendo maior resistência do compósito. Dessa maneira, a borracha de estireno butadieno carboxilada apresenta potencial de ser utilizada para encapsular o material nesse trabalho (AFZAL; KAUSAR; SIDDIQ, 2020; FERREIRA, S. R. *et al.*, 2015; FIDELIS; ANDRADE SILVA, DE; FILHO, R. D. T., 2014; JIANG, S. *et al.*, 2021; LI, Yang *et al.*, 2019; ROCHA FERREIRA *et al.*, 2020; SHI, C. *et al.*, 2021).

2.3 Materiais porosos

Outra forma de melhorar a eficiência dos sistemas de armazenamento de energia térmica em que os materiais de mudança de fase estão inseridos é utilizar materiais porosos como suporte. Os quais podem aprimorar a condução térmica, resistência mecânica e estabilidade química (HUANG, Xiubing *et al.*, 2019).

Tais elementos podem ser dos mais diversos, como por exemplo pode ser observado na Figura 4, grafite expandido (Fig. 4A), esponja metálica de cobre (Fig 4B), aerogel de grafeno (Fig. 4C), perlita expandida (Fig 4D), nanotubos de carbono (Fig 4E), vermiculita expandida (Fig 4F).

Figura 4: Exemplo de materiais porosos utilizados em sistemas de energia térmica.

Legenda: A: grafite expandido, B: esponja metálica de cobre, C: aerogel de grafeno, D: perlita expandida, E: nanotubo de carbono, e F: vermiculita expandida.

Fonte: **A:** (WU, Y.; WANG, T., 2015); **B:** (XIAO; ZHANG, P.; LI, M., 2013); **C:** (LI, G. *et al.*, 2016); **D:** (KARAIPEKLI *et al.*, 2017); **E:** (PRADHAN *et al.*, 2009); **F:** (DENG *et al.*, 2016).

Algumas das características que os materiais porosos podem apresentar, é porcentagem de porosidade, densidade, resistência mecânica, tamanho dos poros e condutividade térmica. Na

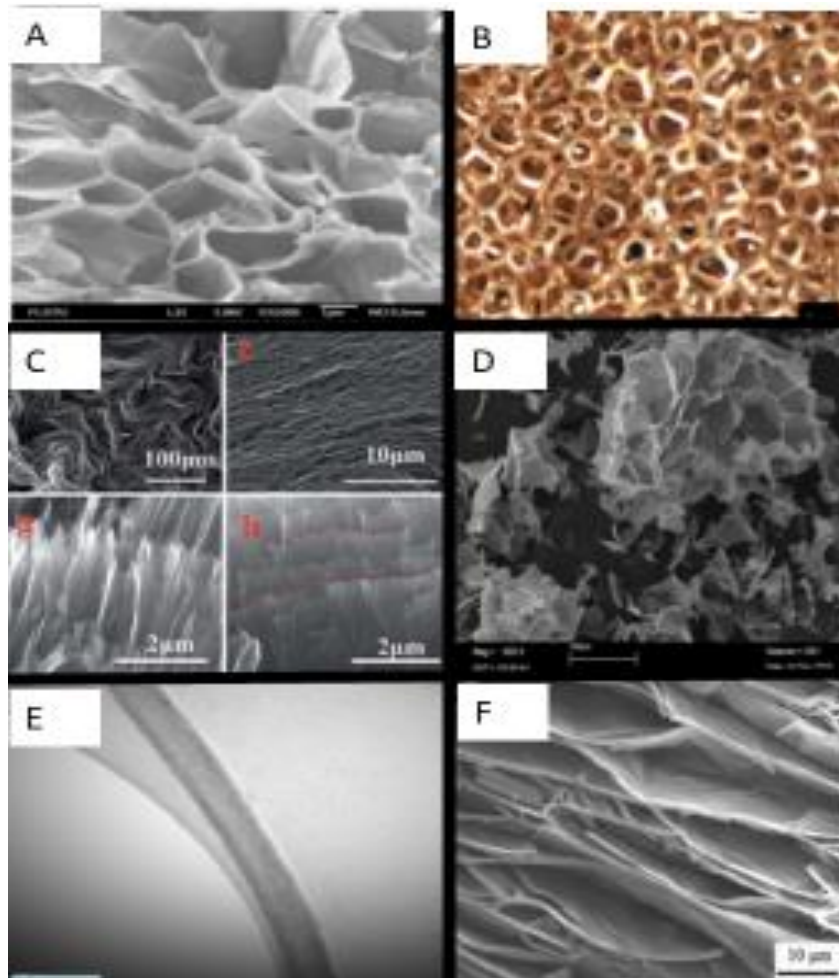


Tabela 1 estão apresentadas diferentes características para os diferentes materiais utilizados como materiais porosos.

Conforme a Tabela 1 os poros podem apresentar dimensões de nanômetros a milímetros e porosidade de 30 a 97% do material. Assim como a porosidade, densidade e condutividade térmica também pode variar. Essas características dos materiais porosos irão oferecer diferentes propriedades e aprimoramentos aos sistemas em que os materiais de mudança de fase estarão aplicados.

Tabela 1: Características dos materiais porosos para diferentes materiais.

Material	Diâmetro dos poros (mm)	Poros (%)	Densidade (g/cm ³)	Condutividade térmica (W/mK)	Saturação (%)	Referencia
Esponja de cobre	<5	87-97	-	-	83-94	(XIAO; ZHANG, P.; LI, M., 2013, 2014)
Esponja de níquel	<5	90-97	-	-	71-91	(XIAO; ZHANG, P.; LI, M., 2013, 2014)
Esponja de alumínio	<1	65-70	0.8-0.94	-	85-88	(HONG; HERLING, 2007; JIANG, J. <i>et al.</i> , 2012)
Grafite expandido	<0.001	92	-	11	-	(WU, Y.; WANG, T., 2015)
Nanotubo de carbono	<0.001	-	1.3	25	-	(PRADHAN <i>et al.</i> , 2009)
Aerogel de Grafeno	<0.001	-	-	1.0-3.0	94	(LI, G. <i>et al.</i> , 2016)
Perlita expandida	<0.001	60	-	0.05	-	(KARAIPEKLI <i>et al.</i> , 2017)
Vermiculita expandida	0.0000138	78	-	-	78	(DENG <i>et al.</i> , 2016)
Resíduos de construção	-	35-45	1.6	0.8	65-80	(MANKEL; CAGGIANO; KOENDERS, E., 2019)

A saturação (Tab 1) se refere ao preenchimento dos poros com PCM. Geralmente a saturação não chega aos 100% para evitar defeitos causados pelo aumento da pressão interna. Isso é devido a dilatação dos materiais com o aumento da temperatura e mudança de estado físico.

No estudo realizado por Mankel et al. 2019 (MANKEL; CAGGIANO; KOENDERS, E., 2019) foi utilizado resíduos de construção como agregados para incorporar PCM em sua porosidade. Os resíduos apresentaram 35 a 40 % do volume de porosidade, os mesmos foram saturados em 65 e 80% com PCM. Posteriormente foram preparados e avaliados compósitos contendo estes agregados.

Outro trabalho que foi utilizado material poroso como agregado foi realizado por Memon et al, 2015 (MEMON *et al.*, 2015). Em seu estudo utilizaram argila expandida, a saturação foi realizada por imersão com despressurização por bomba a vácuo, e o revestimento realizado com resina epoxy e sílica fume. A porcentagem de PCM no agregado foi de 70% aproximadamente.

Contudo, a maioria dos materiais avaliados são inorgânicos e a biomassa também é um material poroso. Com boas características a madeira possui potencial de utilização como material poroso para sistemas contendo material de mudança de fase.

Ding et al, 2008 (DING *et al.*, 2008) avaliou a porosidade e a densidade da madeira de 6 espécies diferentes, resultados descritos na Tabela 2. A porosidade foi mensurada por porosímetro de intrusão de mercúrio. A porosidade se apresentou inversamente correlacionada com a densidade, sendo assim, quanto menor sua densidade maior será a porosidade.

Tabela 2: Porosidade e densidade da madeira de diferentes espécies.

Espécie	Densidade (g/cm³)	Porosidade (%)
Hybrid poplar	0,34	70,6
White cedar	0,35	68,0
Aspen	0,42	60,0
Red oak	0,59	55,0
Silver maple	0,62	52,0
White ash	0,69	49,3

Fonte: (DING *et al.*, 2008).

A porosidade da madeira também pode ser observada suas características anatômicas. Essas características anatômicas variam para cada espécie e são classificadas em dois grupos, as folhosas e as conífera, mais especificamente as angiospermas e as gimnospermas, respectivamente. As principais diferenças nesses grupos são as seguintes, as folhosas possuem fibras, vasos, raios, e parênquimas, já as coníferas possuem traqueídeos, raios e canais resiníferos.

Pode-se observar na Tabela 3 diferentes características anatômicas de diferentes espécies de eucalipto e pinus. Os traqueídeos das coníferas são maiores que as fibras das folhosas, e podem ser mensuradas as estruturas como o comprimento das fibras, diâmetro do lume, altura e largura do raio.

Tabela 3: Propriedades anatômicas da madeira de diferentes espécies.

Espécie	D lume (µm)	C fibra (mm)	A raio (µm)	L raio (µm)	raio/mm²	referencia
Eucalyptus urophylla	5,3	1,06	0,22	12,9	1,24	Lima et al, 2006

E. benthamii	9,2	0,90	0,21	7,6	-	(BALDIN <i>et al.</i> , 2017)
E. dunni	8,4	0,98	0,27	6,0	-	(BALDIN <i>et al.</i> , 2017)
E. grandis	10,4	1,03	0,21	6,2	-	(BALDIN <i>et al.</i> , 2017)
E. saligna	9,3	1,07	0,24	5,5	-	(BALDIN <i>et al.</i> , 2017)
P. Taeda	32,0	3,41	-	-	-	Rigatto et al., 2004

Legenda: D lume: Diâmetro do lume; C fibra: Comprimento da fibra; A raio: Altura do raio; L raio: Largura do raio.

Algumas características como os tilos podem prejudicar a passagem dos líquidos no interior da madeira. Os tilos são uma má formação na parede dos vasos que aparentemente tem a forma de bolhas, eles se formam nos lumes das fibras e interrompem a passagem dos líquidos. Essa característica tem-se observado em trabalhos de tratamento químico da madeira, dado pela impregnação de elementos preservantes (VALLE *et al.*, 2013).

Neste contexto, as coníferas possuem baixa densidade, fuste mais cilíndrico e retilíneo, facilitando seu desdobramento, e assim, incentivaram sua utilização comercial. No Brasil, as espécies do gênero *Pinus sp* são amplamente comercializadas e produzidas. De acordo com o relatório anual de 2022 da Indústria Brasileira de Árvores (IBA) (IBÁ, 2022) em 2021 foram consumidos 50 milhões de m³ de madeira de pinus no Brasil, o qual possui 1,93 milhões de hectares plantados. No mundo em 2022 foram produzidos 1,4 bilhões de m³ de madeiras de coníferas, de acordo com a Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (“Roundwood, coniferous + (Total) Production Quantity in World + (Total)”, [s.d.]).

Contudo, ainda existem diversas espécies nativas no Brasil, dentre elas algumas possuem baixa densidade, e elevada porosidade, que podem apresentar potencial para retenção de PCM, como no caso da Paineira (*Ceibra speciosa* A.St.-Hil.) (CARVALHO, [s.d.]; GIL, 2022; ROMEIRO, 2013).

Algumas pesquisas já avaliaram a aplicação de material de mudança de fase na madeira mostrando ser possível e com potencial de aplicação na construção civil. No estudo realizado por Barreneche *et al.* (2017) (BARRENECHE, C. *et al.*, 2017), foram utilizadas amostras de madeira

de *Alnus Glutinosa* (Amieiro Negro) com uma densidade aproximada de $0,39 \text{ g/cm}^3$ (KIAEI *et al.*, 2016). Com o intuito de incorporar o PCM (Material de Mudança de Fase) RT21 e RT27 da Rubitherm, que possuem temperaturas de fusão de 21°C e 27°C , respectivamente, às amostras de madeira, estas foram confeccionadas com dimensões de $30 \times 15 \times 5 \text{ mm}$. A técnica empregada envolveu o uso de uma bomba a vácuo para impregnar o PCM, sendo avaliados tratamentos com cerca de 10%, 20% e 30% da massa de PCM. Para o revestimento das partículas, foi empregado Poliestireno. Contudo, esses trabalhos não utilizaram a madeira como agregado ou adicionaram em matriz cimentícia.

No estudo conduzido por Said *et al.*, 2020 (SAID; TOHIR, 2020) para avaliar a flamabilidade e a perda de massa ao longo de dias em condições de 50°C em estufa e temperatura ambiente 23°C aproximadamente. Foram utilizados PCMs RT21 e Propil éster, introduzidos em amostras de *Pinus*, auxiliado por bomba vácuo, até obter massa constante, resultando em 32 a 42 % da massa de PCM. O revestimento foi realizado com epóxi acrilato e epóxi acrilato mais polifosfato de amônio, apresentando espessura de aproximadamente de $72 \mu\text{m}$. Foi observado uma variabilidade da perda de massa de até 3% com revestimento e até 10% sem revestimento durante 80 dias.

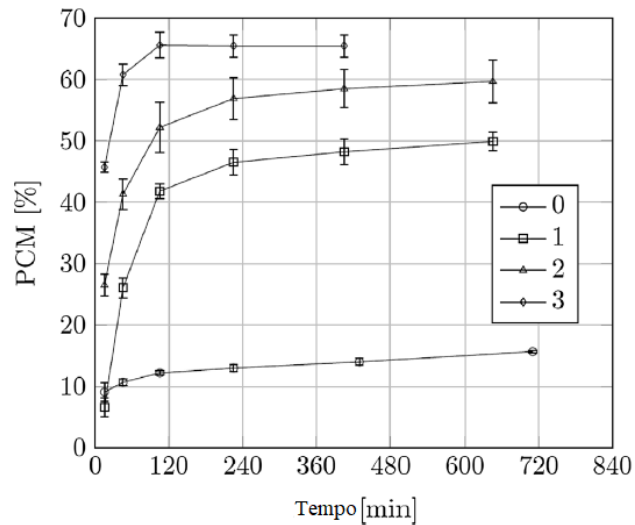
Outro caso interessante foi a utilização de compressão de ar para avaliar a impregnação de PCM em madeira. Vasco *et al.* 2018 (VASCO *et al.*, 2018), utilizou *Pinus radiata* em seu estudo, as amostras foram preparadas com $25 \times 25 \times 100 \text{ mm}$ de dimensão e densidade de 454 g/cm^3 .

A impregnação foi realizada por pressão com auxílio de compressor de ar e câmara com temperatura de $50 \pm 2^\circ\text{C}$, sendo 4 pressões diferentes, de 0, 1, 2 e 3 bar, também foi avaliado a condutividade termal e calor específico em função da concentração de PCM utilizando KD2-Pro analyzer de propriedades termais (Decagon devices Inc.) baseado nas normas IEEE 442 e ASTM 5334, sendo usado duas agulhas com sensor SH-1 para materiais sólidos, que consiste em agulha com aquecedor e sensor térmico, onde uma corrente elétrica é passa pelo aquecedor e conseqüentemente a temperatura aumenta do sensor, e monitorado ao longo do tempo, também foi usado uma pasta condutiva no sensor.

As amostras foram secas a 0% de umidade, as faces laterais foram seladas com folha de alumínio e coladas com silicone, para permitir apenas fluxo tangencial de impregnação, foram pesadas as amostras em 15, 45, 105, 225, 430 e 710 minutos, para avaliar o ganho de massa. Foi calculado a porcentagem de PCM que é igual a massa impregnada menos a massa seca dividido pela massa seca vezes 100. Após impregnada as amostras foram cobertas com plástico filme para evitar absorção de umidade. E não foi observado vazamentos durante a pesquisa. Pode-se observar na Figura 5 a seguir a porcentagem de PCM nas amostras em função do tempo com diferentes condições de pressão (bar), chegando a um máximo de 65%.

Fonte: (VASCO *et al.*, 2018).

Figure 5: Absorção de PCM pela madeira em função do tempo em 4 condições de pressão (bar).



Dessa forma, podemos considerar que é possível adicionar PCM na porosidade da madeira por métodos com vácuo ou com aumento da pressão, entretanto ainda não foi observado sua aplicação em concretos ou outras matrizes utilizadas na construção civil.

2.4 Aplicações dos materiais de mudança de fase

Os materiais de mudança de fase podem ser aplicados em sistemas de concentração de energia solar, manutenção passiva térmica de baterias, sistemas de aquecimento solar de água, armazenamento a frio, termo fotovoltaicos, microeletrônicos, tecidos termorreguladores, entre outras (ATWOOD, 2008; BOUGUERRA *et al.*, 1999; BROWNE; NORTON; MCCORMACK, 2015; IQBAL; SUN, 2014; JOHNSTON *et al.*, 2008; LING *et al.*, 2014; MAHFUZ *et al.*, 2014; SEYF; HENRY, 2016; XU, B.; LI, P.; CHAN, 2015).

Para determinar sua aplicação é levado em conta a temperatura de fusão do material. Para embalagens e armazenamento de alimentos a baixa temperatura, a temperatura de mudança de fase é em torno de 5°C ou inferior, dependendo da temperatura necessária para conservação do produto (ARJENAKI; SOLTANIZADEH; HAMDAMI, 2019; HOANG *et al.*, 2014, 2015; LEDUCQ; NDOYE; ALVAREZ, 2014; MELONE *et al.*, 2012; SINGH, S. *et al.*, 2018; SINGH, S.; GAIKWAD; LEE, Y. S., 2018; ÜNAL; KONUKLU; PAKSOY, H., 2019).

Na construção civil os materiais de mudança de fase têm objetivo de controlar a temperatura interna do ambiente. A qual está relacionada com a temperatura do conforto térmico, aproximadamente 23°C, logo, será a temperatura de mudança de estado do PCM. Assim, a temperatura do ambiente apresentará uma amplitude menor em relação a temperatura externa da construção. E dessa maneira, reduz o consumo de energia elétrica para o controle térmico dos ambientes (BOER *et al.*, 2020; SHARIFI; SAKULICH, 2015; STRITIH; BUTALA, 2010).

As aplicações dos materiais de mudança de fase na construção civil podem ser de vários modos. Direto em meio ao concreto ou tijolos, dos quais podem ocorrer vazamentos. Utilizando-se micro, macro capsulas ou materiais porosos em meio ao concreto ou tijolos, ou como tubos em sistemas de ar, placas sobre o teto ou parede (LECOMPTE *et al.*, 2015; RAMAKRISHNAN *et al.*, 2015; ROUAULT *et al.*, 2013; SINGH RATHORE; SHUKLA; GUPTA, 2020).

Mesmo com algumas formas de aplicação, ainda se buscam por formas inovadoras de aplicação. No oriente médio, onde a temperatura pode chegar aos 44°C, placas com diferentes espessuras contendo material de mudança de fase foram avaliadas, mostrando sua eficiência energética em comparação com um ambiente sem a aplicação, junto com o consumo elétrico de ar-condicionado para controle térmico do ambiente (AKEIBER *et al.*, 2017).

Em Shanghai uma sala foi construída com tijolos contendo material de mudança de fase. A qual foi avaliada durante todo ano sob as condições climáticas de inverno e verão e comparando a eficiência térmica e energética com uma sala padrão (WANG, Xu *et al.*, 2016).

2.5 Caracterização dos materiais de mudança de fase

Para os estudos de novos desenvolvimentos com os PCMs, ou novos materiais como PCMs faz se necessário sua caracterização, e assim avaliar suas qualidades e aplicação.

Para a caracterização algumas análises que podem ser realizadas, são as seguintes: difração de raio X, microscópicos óticos e térmicos, microscópico eletrônico de varredura, microscópico de força atômica, espectroscopia molecular, quimiluminescência, varredura

diferencial de calorimetria, estabilidade química a fogo, compatibilidade entre os materiais, comportamento reológico, estabilidade térmica, estabilidade física de lodos e propriedades mecânicas por nano endentação (INÉS FERNÁNDEZ *et al.*, 2015).

A difração de raio X e infravermelho é utilizada para caracterizar a estrutura química do material. No trabalho de Ushak *et al.*, 2015 foi utilizado difractômetro de raio X SIEMENS modelo D500 (40kv, 30 mA), radiação de Cu K α 1 (λ -1.5406 Å); Vertical Bragg-Brentano; escaneado de 3 a 70° a cada 0.002° e 1 segundo de intervalo. Os dados foram comparados com centro internacional para dados de difração [www.icdd.com]. Nesse trabalho os resultados apresentaram algumas impurezas no material, devido alguns picos e intensidades diferentes nos resultados encontrados em comparação com os dados do centro internacional de dados de difração (USHAK *et al.*, 2015).

Gilart *et al.* 2012, caracterizaram grafite e grafite expandido, por meio da espectroscopia Raman. Com um excitador Ar-Kr laser (514.5 nm) e um detector monochromator triplo (Jobin Yvon T 64000) equipado com dispositivo esfriador a base de nitrogênio líquido. Também foi realizado difração de raio X para contribuir nas análises, onde que os resultados mostram os picos principais do grafite e alguns menores que possam ser pequenas imperfeições no material (MANTILLA GILART *et al.*, 2012).

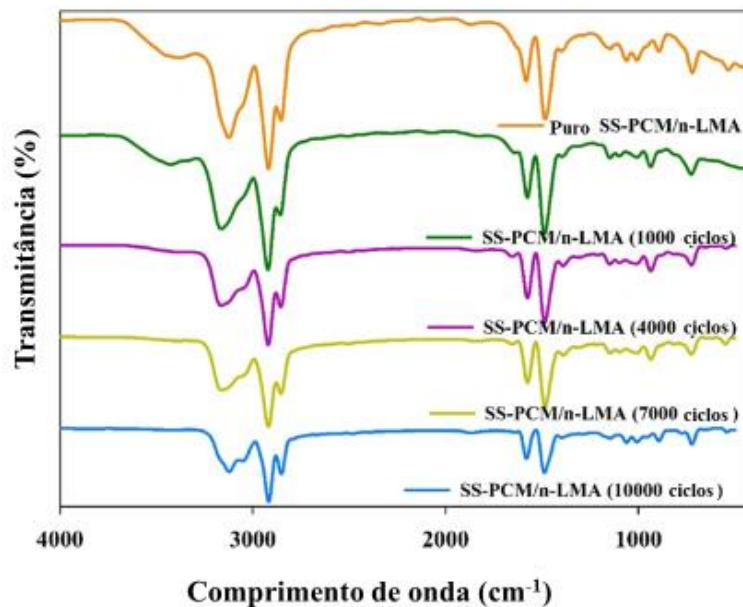
Abid *et al.*, 2012, realizaram caracterização química de uma mistura eutética de materiais de mudança de fase orgânico-inorgânico. As análises foram de infra vermelho, transformada de Fourier, Raman, e difração de raio X a (ABID, H. *et al.*, 2012).

Por meio das técnicas de avaliação químicas é avaliada a durabilidade dos PCMs. Após determinada quantidade de ciclos as análises são refeitas para observar possíveis reações, também é complementada por imagens microscópicas para observar se teve vazamentos, rachaduras e outros defeitos.

Conhecido como ciclagem, consiste em repetidos ciclos de aquecimento e resfriamento em uma faixa de temperatura, a qual abrange a mudança de estado do PCM. Os ciclos podem ser realizados por equipamentos como uma câmara de ciclo termal, estufa, ou o DSC. São recomendado 2000 ciclos para embalagem e transporte de alimentos, aplicativos médicos e tecidos para conforto térmico. 5000 ciclos para controle térmico de eletrônicos, 7000 ciclos para aplicações em construções, 10000 ciclos para controle térmico de espaçonaves (RAJ *et al.*, 2021).

Na Figura 6, a seguir pode-se observar resultados da análise de FT-IR do PCM antes dos ciclos (Laranja), após 1.000 (verde), 4.000 (roxo), 7.000 (amarelo) e 10.000 ciclos (azul) obtidos por Raj et al, 2021. A análise FT-IR mostra no espectro de 4000 a 1500 cm^{-1} as ligações fortes, que são os grupos funcionais padrão como $-\text{OH}$, $\text{C}=\text{O}$ e $\text{N}-\text{H}$, a região de impressão digital de 1500 a 400 cm^{-1} representa as ligações intermolecular específicas de cada material. Para a ciclagem foi utilizado uma câmara de ciclo termal, com variação de temperatura de 4 a 30 $^{\circ}\text{C}$, com taxa de aquecimento de 4 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Após as ciclagens também foram obtidas imagens por microscópio eletrônico de varredura (MEV) mostrando que não teve rachaduras ou vazamentos

Figura 6: Resultados da análise FT-IR de SS-PCM para diferentes quantidades de ciclos.



das capsulas (RAJ *et al.*, 2021).

Fonte: (RAJ *et al.*, 2021).

Solé et al. 2014 observaram o aparecimento de determinados picos que podem ter sido causados pela oxidação do material após a ciclagem. A ciclagem foi realizada com equipamento DSC com uma taxa de aquecimento de 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$. A durabilidade do PCM orgânico após 20, 50 e 100 ciclos foi avaliada por FT-IR (SOLÉ *et al.*, 2014).

As propriedades térmicas obtidas pela varredura diferencial de calorimetria (DSC) são a temperatura de fusão, o calor latente, calor sensível e entalpia. Uma técnica fundamental para caracterização dos materiais de mudança de fase. Para isso o material é submetido a uma taxa de

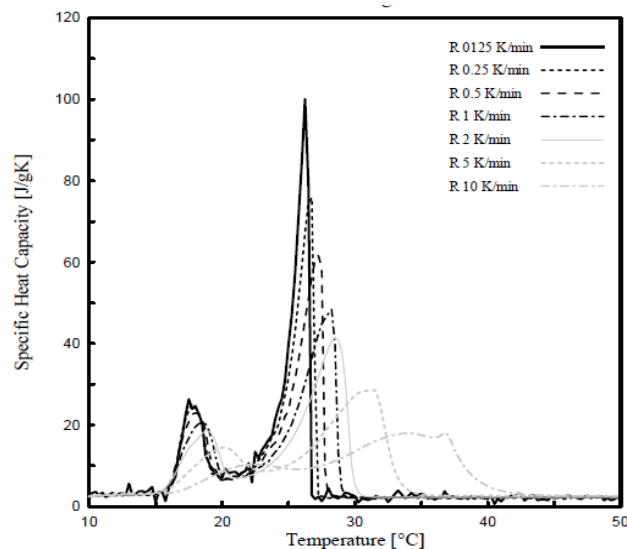
aquecimento, e assim obtendo-se a variação da temperatura em função das calorias absorvida pelo material, sendo possível calcular e obter suas propriedades térmicas. Entretanto, a taxa de aquecimento pode influenciar nos resultados finais, sendo que é recomendado baixa taxa de aquecimento, para obter resultados mais exatos, pois alta taxa de aquecimento pode camuflar o resultado (FABIANI *et al.*, 2020).

Pode-se observar os resultados de diferentes taxas de aquecimento, de 0,0125 até 10 °C/min na Figura 7, a baixa taxa de aquecimento apresenta um pico bem mais elevado e significativo em uma pequena faixa de temperatura, indicando o alto calor latente da mudança de estado. Enquanto a maior a taxa de aquecimento menor é o pico e abrange uma maior variação de temperatura (SAM *et al.*, 2020).

As análises térmicas de compósitos podem ser realizadas pela metodologia *dynamische kugel kalorimetrie* (DKK). Koenders et al, 2018 desenvolveram essa metodologia de análise, a qual são produzidas esferas com 7cm de diâmetro dos compósitos a serem analisados. Na esfera é colocado um termopar no interior da esfera e outro na superfície para acompanhar a temperatura ao longo do tempo quando submetido a variação térmica. Em seu trabalho foi utilizado PCM com temperatura de mudança de estado de 24°C, e as amostras foram submetidas a ciclos térmicos de 5 a 50 °C, com intervalo de 90 minutos a cada aquecimento ou resfriamento (KOENDERS, E.A.B.; MANKEL, C.; CAGGIANO, 2018).

Fonte: (SAM *et al.*, 2020).

Figura 7: Resultados de diferentes taxas de aquecimento da análise de varredura diferencial de calorimetria (DSC).



A viscosidade dos materiais de mudança de fase pode influenciar na transferência de temperatura, por convecção durante seu estado líquido, e no escoamento, quando aplicado em sistemas de bombeamento. Com reômetros essas características podem ser obtidas e auxiliar nas decisões. O aumento da temperatura aumenta a viscosidade do material, sendo de forma abrupta no início da variação térmica e mais suave posteriormente (FAYAZ; GOLI; KADIVAR, 2017; MU *et al.*, 2016; PARAMESHWARAN *et al.*, 2014; RUDRA MURTHY; GUMTAPURE, 2020).

2.6 Caracterização mecânica

Na construção civil, faz-se necessário conhecer as características mecânicas dos materiais. Na produção do concreto são utilizados agregados para proporcionar volume e diminuir o consumo de cimento, esses agregados podem ser miúdos ou graúdos, dependendo da dimensão das partículas, bem como sua finalidade. A avaliação mecânica normalmente é realizada seguindo normas que determinam o tamanho das amostras e produção da argamassa e concreto, contudo, há pesquisas que avaliam a diretamente a resistência mecânica dos agregados e também a avaliação mecânica por nano endentação de nano capsulas de PCM (GIRO-PALOMA *et al.*, 2013; ŠAVIJA; ZHANG, Hongzhi; SCHLANGEN, 2017).

A avaliação das partículas pode ser por diferentes métodos, tradicionalmente é mais utilizado o método de compressão com a máquina universal de ensaios mecânicos. Entretanto, devido à dimensão e forma irregular das partículas, não possui uma norma técnica padronizando sua avaliação como existe para avaliação dos concretos, como normas Europeias ou Americanas estipularam um padrão para avaliação dos materiais (TAVARES, Luís Marcelo, 2007).

Para avaliar diferentes materiais e formas de agregados pode ser utilizado o método Point Load Test (PLT) ou teste de ponto de carga, equipado com célula de carga de 50 kN, e para alguns cálculos utilizar a norma ASTM D5731: 2016 (SILVA, N. V. *et al.*, 2019).

Também há o teste de compressão de partículas únicas com equipamento eletromecânico de teste universal (AG-Xplus da Shimadzu). Pepe *et al.*, 2020 avaliaram partículas como agregado graúdo, foram classificadas de acordo com a ASTM C 33 de 2013, de 4,75 a 9,5 mm e 9,5 a 12,5

mm. Foram avaliados partículas de calcário, cascalho de rio, reciclado de tijolos e concretos, e argila expandida (PEPE *et al.*, 2020).

Como as partículas possuem forma diferente uma das outras, os resultados podem apresentar alto coeficiente de variação. Para evitar ou diminuir esse efeito pode ser utilizado coeficientes de forma nas formulas. Cheshomi et al, 2013 e 2015 (CHESHOMI; MOUSAVI; AHMADI-SHESHDE, 2015; CHESHOMI; SHESHDE, 2013), compararam dois diferentes cálculos da força resultante. Os autores utilizaram rochas de arenito, moeram e manualmente deram uniformidade esférica aos agregados, e realizaram compressão de partículas únicas.

Ren et al., 2021 (REN, M. *et al.*, 2021) avaliaram um concreto de alta performance contendo micro capsula de material de mudança de fase. Foi realizado conforme a norma chinesa GB/T 17671-1999, utilizando máquina universal de teste, o ensaio de flexão de 3 pontos com vão de 100 mm e uma taxa de deslocamento de 0.4mm/min, e para força de compressão foi utilizado 2.4kN/s.

Mahzuz & Ahmed, (2012) (MAHZUZ; AHMED, 2012) avaliaram biomassa como agregado graúdo. Utilizando uma máquina de compressão foi avaliado concreto com agregados graúdo de madeira, vime e bambu. As biomassas foram cortadas com dimensão de 12,5 x 25 mm. Os concretos foram preparados em amostras em forma de cilindro, com dimensões de 300 mm de altura por 150 mm de diâmetro. Foi observado uma redução da resistência mecânica com a utilização das biomassas como agregados em relação à referência. Possivelmente a redução é devido a ligação entre o concreto com os materiais lignocelulósicos.

Mankel et al., 2019 (MANKEL; CAGGIANO; KOENDERS, E., 2019) realizaram os ensaios mecânicos conforme a norma EN 196-1 para avaliar compósitos. Os quais foram constituídos de cimento e agregados reciclados de tijolos contendo material de mudança de fase em sua porosidade. As amostras foram preparadas com dimensões de 160 x 40 x 40 mm, foi feita ensaio de flexão de três pontos com vão de 100 mm e carga vertical de 50 N/s até a quebra, após esse ensaio, foi utilizada metade da amostra para avaliação de compressão.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

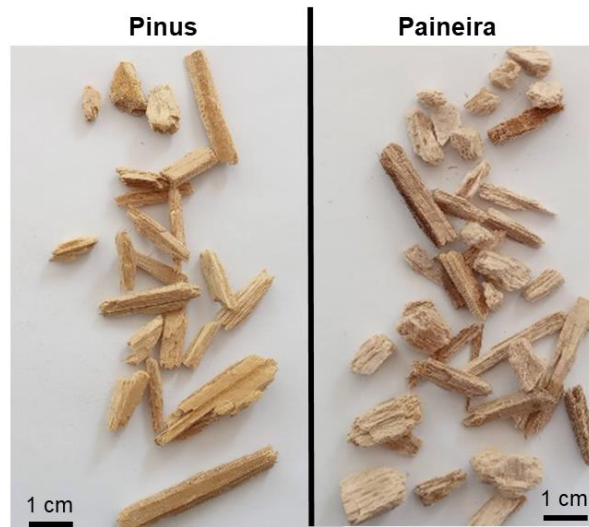
3.1 Materiais

Foram obtidas partículas de madeira de duas espécies diferentes, para isso foram obtidas madeiras de *Pinus* spp (Pinus), e *Ceiba speciosa* (Paineira) na serraria do departamento de engenharia florestal da Universidade Federal de Lavras (UFLA).

As tábuas foram reduzidas em cavacos com aproximadamente 10 cm de comprimento e 2 cm de espessura e então moídas em moinho de martelo com peneira de abertura de 20 mm. O material obtido da moagem foi peneirado para classificação e obtenção das partículas, para isso foi utilizado uma peneira com abertura de 5,6 mm, sendo utilizado o material retido na peneira para estudo. Pode ser observado na Figura 8 partículas da madeira de Pinus e Paineira.

Fonte: Leonardo Seibert Kuhn (2024).

Figura 8: Partículas de madeira de Pinus e Paineira.



Como materiais de mudança de fase foram utilizados CrodaTherm 24, obtido pela empresa Croda Internacional Plc, com temperatura de fusão de aproximadamente 24 °C e calor latente de 183 J/g. Também foi utilizado óleo de coco obtido comercialmente, para avaliação como potencial material de mudança de fase alternativo.

Para encapsulação foi utilizado borracha de estireno butadieno carboxilado (XSBR) obtido pela empresa Nitriflex S/A Ind. E Com., contendo 50% de teor de sólidos, e areia peneirada com dimensão menor de 300 µm.

Para produção dos compósitos foi utilizado cimento CPV-ARI comercial da empresa Nacional. Foi utilizado brita de granito como agregado graúdo e areia fina adquiridos comercialmente em loja de material de construção.

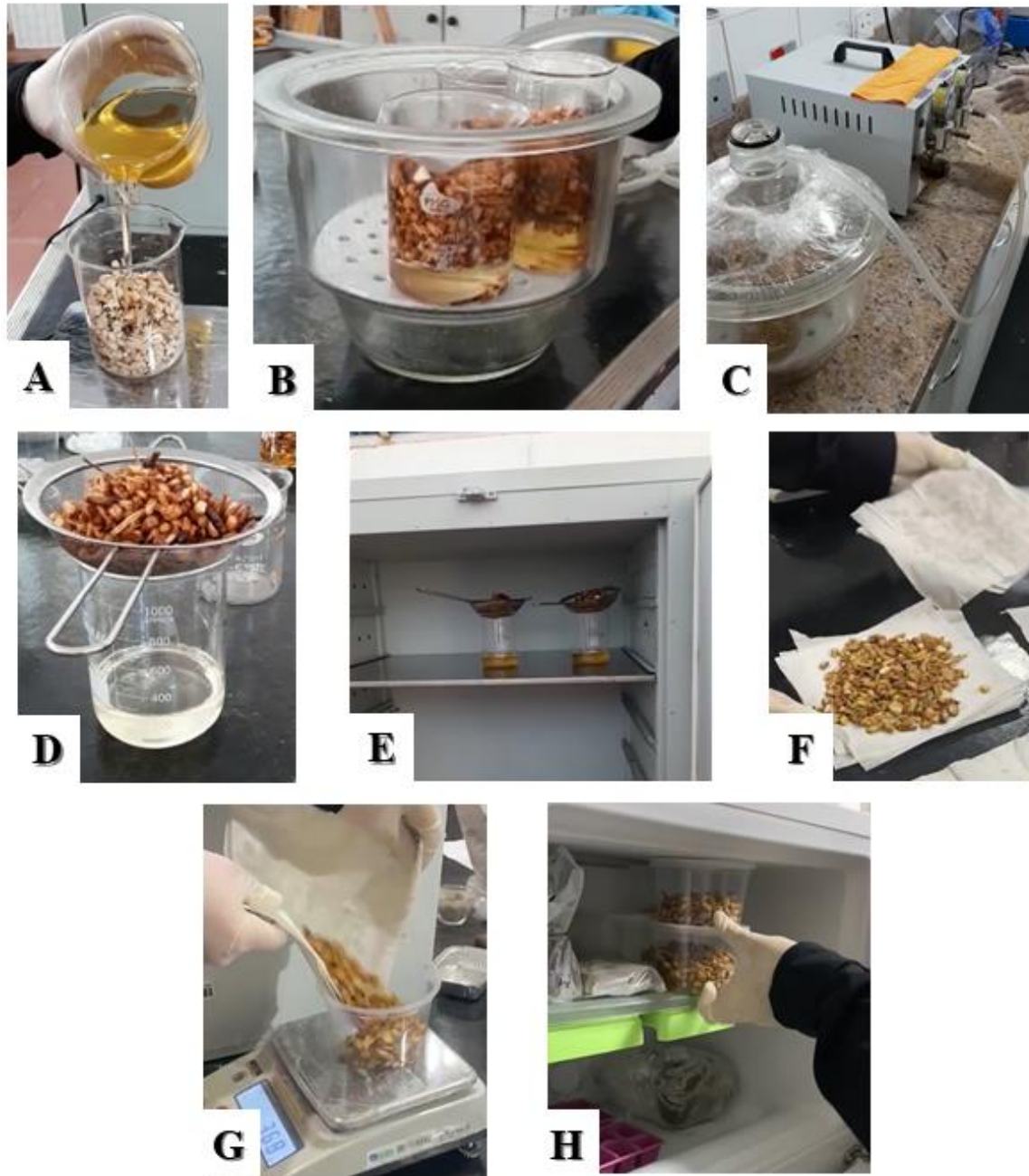
3.2 Produção dos Bio agregados

3.2.1 Processo de Saturação

O processo de saturação das partículas com PCM, obtido pela empresa Crodatherm ou óleo de coco, foi realizado por imersão em sistema a vácuo, como pode ser observado na Figura 9, durante seu estado líquido. Foi utilizado béqueres, dessecador e bomba a vácuo. As partículas foram condicionadas nos béqueres e completado com o PCM em estado líquido (Fig. 9A), e então alocadas no dessecador para a despressurização a -650 mmHG (Fig. 9B,C), sendo mantidas em condições de vácuo por 24h.

Após a saturação, as partículas foram retiradas e transferidas para uma peneira plástica para escoamento do PCM excedente (ver Fig. 9D), sendo então mantidas em estufa a 45 °C para drenagem do excesso de PCM (Fig. 9E). Após o escoamento excedente, as partículas foram acomodadas sob folhas de papel toalha para retirada do material superficial (Fig. 9F,G). Por fim as partículas foram acondicionadas em refrigerador a -5 °C (Fig. 9H) para solidificação do PCM para posterior processo de encapsulação.

Figure 9: Processo de saturação das partículas com PCM.



Legenda: Imersão das partículas com PCM (A), acondicionamento dos béqueres no dessecador (B), despressurização com bomba a vácuo (C), escoamento do PCM (D), alocação em estufa durante escoamento (E), utilização de papel toalha (F), deposição em recipiente (G) e acondicionamento em refrigeração (H).

Fonte: Leonardo Seibert Kuhn (2024).

3.2.2 Processo de encapsulação

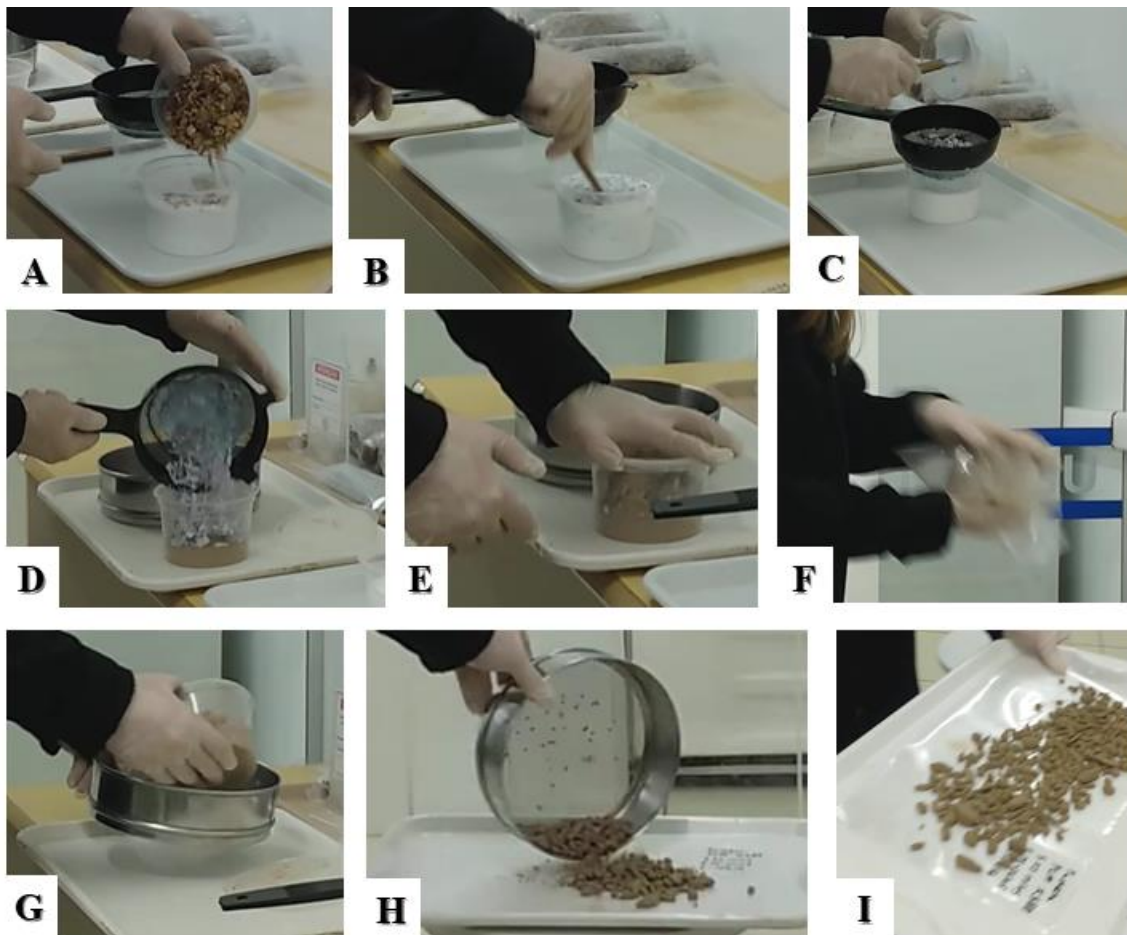
O processo de encapsulação das partículas de madeira contendo ou não PCM foi baseado na metodologia de Memon et al, (2015) (MEMON *et al.*, 2015). Realizado em sala climatizada a $18\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ com auxílio de bandejas, peneiras e recipientes plásticos. O processo pode ser observado na Figura 10.

Em um recipiente preenchido com borracha líquida (Fig 10A) foram despejadas as partículas de madeira, podendo ser aquelas que contêm PCM ou óleo de coco, ambos em estado sólido. Após essa etapa, as partículas foram misturadas à borracha manualmente (Fig 10B). Em seguida, as partículas foram dispostas em uma peneira para escoar o excesso de borracha (Fig 10C).

Em seguida as partículas foram transferidas para outro recipiente contendo areia (Fig 10D). A proporção utilizada foi de aproximadamente de 50 a 100 gramas de partículas para cada 200 gramas de areia. O recipiente foi selado (Fig. 10E) e foi realizada uma agitação manual (Fig. 10F) para promoção da separação das partículas e otimização do processo de encapsulação, formando uma camada mista de areia e borracha para envolvê-las.

Por último, o material foi peneirado novamente (Fig. 10G), para remover o excedente de areia e obter os bioagregados. Posteriormente foram espalhados em bandeja (Fig. 10H,I) para cura da borracha, sendo mantida em sala climatizada por uma semana.

Figura 10: Processo de encapsulação dos bio agregados.



Legenda: Adição das partículas em borracha (A), em sequência a imersão (B), escoamento da borracha (XSBR) (C), adição das partículas com XSBR em areia (D), fechamento do pote (E) e agitação (F), escoamento da areia (G), despejo dos bio agregados em bandeja (H) e bio agregados espalhados em bandeja para secagem da borracha (I).

Fonte: Leonardo Seibert Kuhn (2024).

3.3 Produção dos compósitos

Para o presente trabalho foram desenvolvidos 11 materiais compósitos a base de cimento, incluído um compósito de referência. O traço para cada compósito estudado está apresentado na Tabela 4. Os traços foram desenvolvidos com base no trabalho realizado por Melo et al. (2023). A proporção, em massa, determinada de referência foi de 1:2,6:2,7:0,6 para cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e água, respectivamente. Para os demais compósitos, foi substituído o volume de brita por mesmo volume de bio agregados.

Foram produzidos compósitos com diferentes bio agregados para avaliar o impacto de cada componente dos bio agregados, sendo eles, somente a madeira, a madeira revestida, e pôr fim a madeira com PCM e revestimento.

Tabela 4: Proporção em massa utilizada para produção dos compósitos estudados.

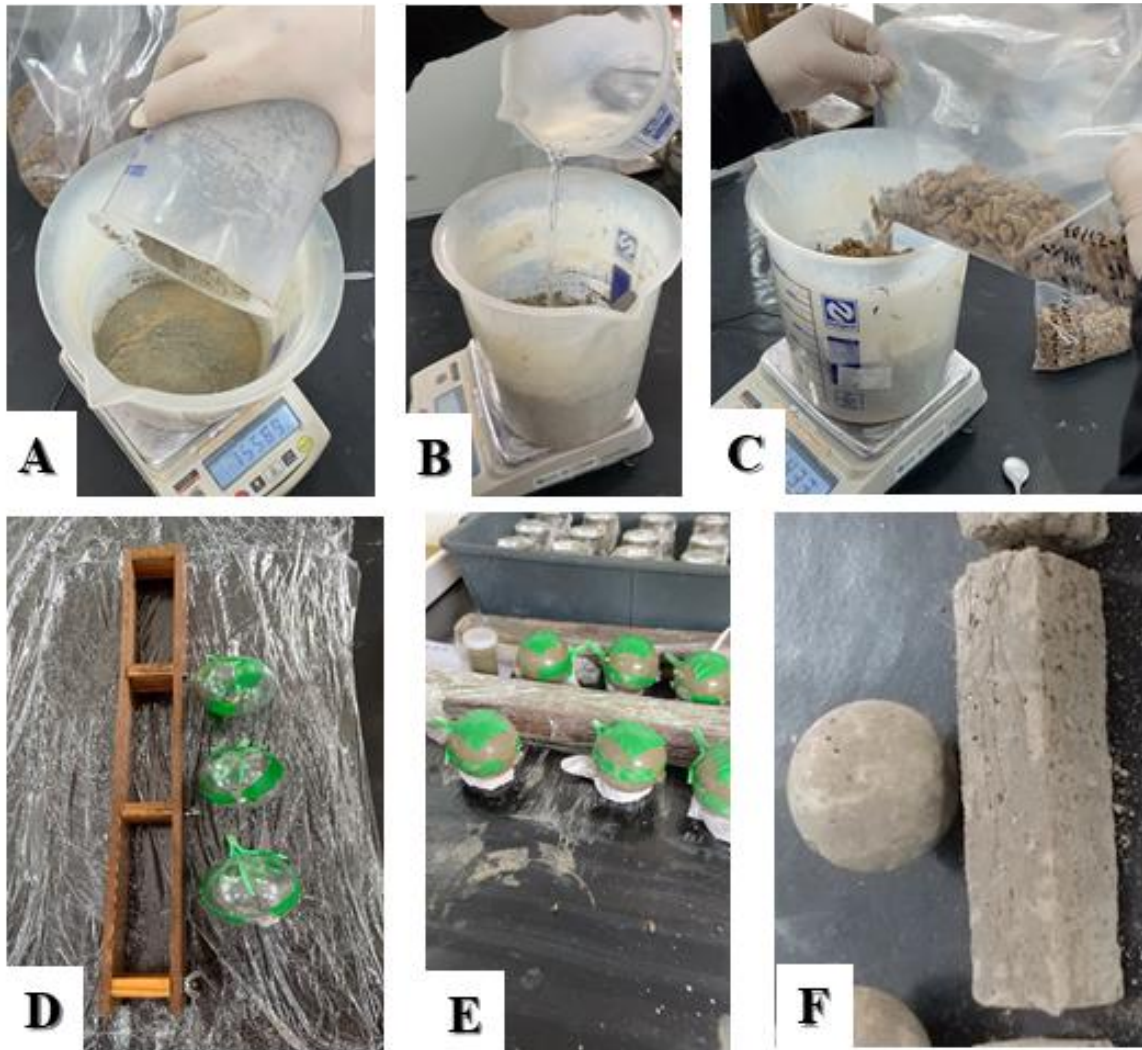
Compósito	Cimento	Traço		
		Água	Agregado miúdo	Agregado graúdo
Agregado graúdo mineral	1	0,6	2,6	2,70
Pinus	1	0,6	2,6	0,67
Paineira	1	0,6	2,6	0,34
Paineira PCM XSBR	1	0,6	2,6	1,08
Paineira Coco XSBR	1	0,6	2,6	1,10
Paineira XSBR	1	0,6	2,6	0,90
Paineira XNBR	1	0,6	2,6	0,80
Pinus PCM XSBR	1	0,6	2,6	1,39
Pinus Coco XSBR	1	0,6	2,6	1,35
Pinus XSBR	1	0,6	2,6	1,08
Pinus XNBR	1	0,6	2,6	1,09

Fonte: Leonardo Seibert Kuhn (2024).

O processo de produção dos compósitos pode ser observado na Figura 11. Primeiramente foi preparada a argamassa misturando-se o cimento e areia (Fig. 11A), utilizando-se uma argamassadeira de 6 litros, adicionado a água (Fig 11B) e misturado novamente, para então ser adicionado os bio agregados (Fig. 11C), ou o agregado de referência.

Os moldes para os ensaios mecânicos e térmicos foram preparados previamente (Fig. 11D) e então preenchidos com o compósito e selados (Fig. 11E). Após 5 dias nos moldes as amostras foram desmoldadas (Fig. 11F) e embaladas em sacolas plásticas e seladas, e armazenadas em sala climatizada a $18^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ por 28 dias para os ensaios mecânicos e térmicos.

Figura 11: Processo de produção dos compósitos.



Legenda: Adição da areia e cimento no recipiente (A), adição de água (B), adição do bio agregado (C), moldes utilizados para formação das amostras (D), moldes fechados para cura do material (E) e amostras após desmolde (F).

Fonte: Leonardo Seibert Kuhn (2024).

3.4 Análise de Rendimento, Densidade e Composição

Após a moagem, classificação e obtenção das partículas foi calculado em porcentagem os rendimentos das partículas para produção dos bio agregados. Para isso foi obtido a massa das partículas antes da classificação e após a classificação.

Foi avaliado a densidade aparente de cada tipo de bio agregado. Isto foi realizado pelo método estequiométrico, diferentes amostras de cada tratamento foram mensuradas a massa com balança de precisão e posteriormente o volume por imersão e calculado a densidade para posteriormente obter a proporção para produção dos compósitos.

A densidade dos compósitos foi obtida após os 28 dias de cura, após a abertura da embalagem plástica foi mensurada a massa e o volume para posterior realização dos ensaios mecânicos.

As porcentagens de massa dos materiais foram calculadas da seguinte forma, para os bio agregados as massas de cada material foram obtidas da seguinte forma, a massa das madeiras antes da imersão e saturação com PCM, após o processo de saturação e após o processo de encapsulamento, para os compósitos foi utilizado os valores de massas para produção dos mesmos.

Foram obtidas imagens microscópicas detalhadas dos agregados e das rupturas dos compósitos. Essas imagens microscópicas proporcionaram uma análise minuciosa das características estruturais e das falhas nos compósitos, permitindo uma compreensão aprofundada da sua morfologia e propriedades. Essa abordagem de imagem desempenhou um papel fundamental na investigação e na avaliação da integridade dos bio agregados e compósitos.

3.5 Espectroscopia Infravermelho de Reflexão Total Atenuada (ATR-IR)

Essa análise tem como objetivo a avaliação das estruturas químicas, compatibilidade química entre os materiais e durabilidade dos materiais ao longo dos ciclos. Para isso foi analisado cada material utilizado e os materiais produzidos. As amostras de PCM e borracha foram obtidas em seu estado líquido, e para as partículas de madeira e bio agregados foram realizados cortes transversais para obtenção das amostras.

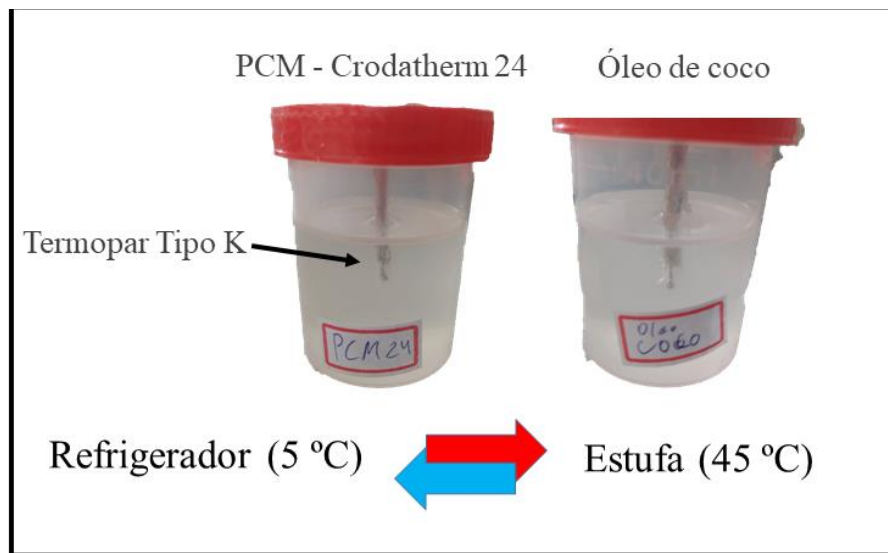
Esta etapa foi realizada no laboratório de espectroscopia na região do infravermelho – FTIR da Central de Análise e Prospecção Química (CAPQ) pertencente ao Departamento de Química (DQI) da Universidade Federal de Lavras (UFLA). As análises de espectroscopia FTIR foram realizadas com as amostras de aproximadamente 1 a 2 mg em seguida foram colocadas sob um suporte, para leitura do espectro em um espectrômetro Varian 600-IR. Os espectros foram obtidos utilizando 32 *scans* por amostra entre 400 e 4000 cm^{-1} e uma resolução de 4 cm^{-1} .

3.6 Análise térmica

3.6.1 Análise do PCM e Óleo de coco

Visando a comparação e avaliação do comportamento térmico, foi conduzida uma análise comparativa entre o óleo de coco e o material de mudança de fase (PCM), Crodatherm 24. Para cada amostra de óleo de coco e PCM, 25g foram acondicionados em recipientes plásticos de 50 ml com tampa, com um termopar do tipo K – 24awg inserido para monitoramento térmico (Fig. 12).

Figura 12: Esquema dos materiais para análise térmica comparativa do entre Óleo de Coco e PCM (Crodatherm 24).



Fonte: Leonardo Seibert Kuhn (2024).

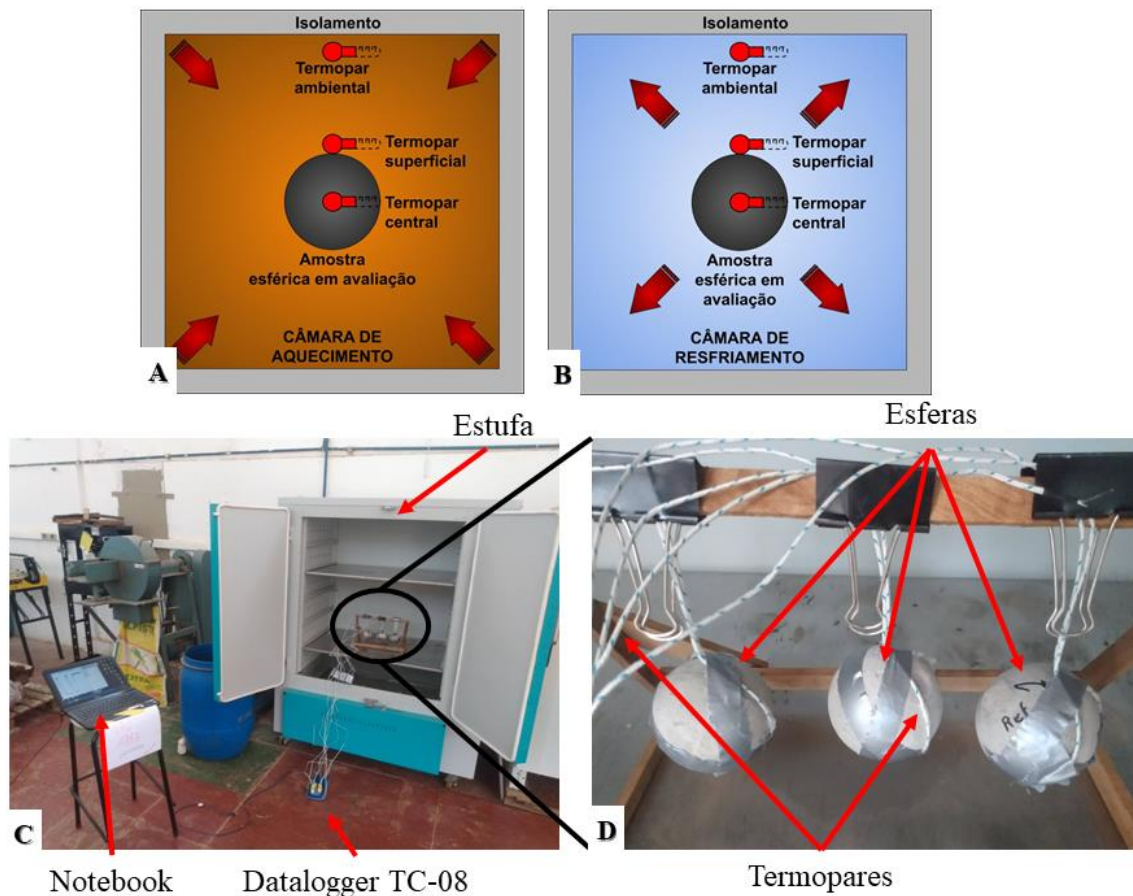
O experimento consistiu em expor as amostras a dois ambientes controlados, um refrigerador mantido a $5\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$ e uma estufa a $45\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$, por um período de 3 horas em cada ambiente. Este procedimento permitiu uma observação detalhada do comportamento térmico de ambos os materiais ao longo do tempo por meio dos gráficos gerados a partir dos resultados obtidos.

3.6.2 Análise dos Compósitos

A análise térmica dos compósitos foi realizada conforme a metodologia denominada *dynamische kugel kalorimetrie* (DKK) (KOENDERS, E.A.B.; MANKEL, C.; CAGGIANO, 2018). Foram produzidas 3 esferas de cada compósito, com 70 mm de diâmetro nominal.

O esquema e disposição dos equipamentos para a análise estão representado na Figura 13. Em cada esfera foi colocado um termopar (tipo K, 24awg) no interior e outro na superfície da esfera (Fig. 13A,B). Também foi mantido um termopar exposto para registrar a temperatura ambiente, no interior do equipamento de aquecimento ou refrigeração.

Figura 13: Sistema de análise térmica dos compósitos.



Legenda: Esquema da disposição dos termopares na esfera (A e B) durante o aquecimento (A) e durante o resfriamento (B). Arranjo dos equipamentos e materiais para análise (C) e suporte para as esferas (D).

Fonte: Leonardo Seibert Kuhn (2024).

Na Fig. 13 C está à mostra os equipamentos e amostrar para análise, indicado por setas a estufa com as amostras, o data logger para conexão dos termopares conectado ao notebook.

As esferas foram submetidas a aquecimentos e resfriamento de 5°C a $45^{\circ}\text{C} + 3^{\circ}\text{C}$, com um refrigerador e uma estufa. As esferas foram fixadas em um suporte (Fig. 13D) de maneira que ficassem suspensas e evitar contato com outros materiais que poderiam influenciar na análise térmica.

A variação da temperatura da esfera em relação ao tempo foi registrada com um intervalo de 20 segundos por equipamento USB TC-08 Thermocouple Data Logger com PicoLog Data Logging Software.

3.7 Análise Mecânica dos Compósitos

As análises de flexão e compressão foram realizadas de acordo com a norma EN 196-1 (196-1, 2016). Para isso foram produzidas amostras de 40 x 40 x 160 mm, as quais foram submetidas ao teste de flexão de 3 pontos, com vão de 100 mm e carga de 50N/s até a ruptura. Posteriormente, as amostras foram serradas 40 mm das extremidades para obter cubos de 40 mm para o ensaio de compressão com carga de 50 N/s.

Foi conduzida uma análise estatística utilizando o método de Tukey para avaliar e comparar as médias dos diferentes compósitos no estudo, identificando quais grupos apresentavam diferenças estatisticamente significativas em relação aos bio agregados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Rendimento, Densidade e Composição

Por meio da classificação para obtenção das partículas de madeira com peneira de abertura de 5,36mm foi calculado a porcentagem da massa de partículas obtidas após a classificação para as duas espécies. Os rendimentos em porcentagem de massa da classificação e obtenção das partículas foram de 33% para a madeira de Paineira e 26% para a madeira de Pinus. Esses resultados podem estar relacionados com as características de cada tipo de madeira, como sua densidade e resistência mecânica.

A densidade dos materiais utilizados como agregados estão descritos na Tabela 5. Estão descritos o agregado gráudo como material de Referência, madeira de Pinus e Paineira, e os demais bio agregados produzidos com ambas as madeiras estudadas.

A densidade aparente da madeiras Pinus e Paineira apresentam valores médios de densidade básica aproximadamente de 450 e 250 Kg/m³ respectivamente. A madeira de Pinus em comparação com a madeira de Paineira, é praticamente o dobro do valor. Contudo, em relação a literatura a densidade apresentada é a básica, calculada a partir do volume saturado e massa seca, diferente dessa onde as massas contêm um determinado teor de umidade.

Tabela 5: Densidade e porcentagem dos bio agregados produzidos.

Agregado	(g/cm³)	Desv.Pad	Materiais (%)		
			Madeira	PCM	Revestimento
Agregado graúdo	2,45	0,023	100	0	0
Pinus	0,60	0,031	100	0	0
Paineira	0,31	0,017	100	0	0
Paineira PCM XSBR	0,98	0,008	9,46	23,64	66,90
Paineira Coco XSBR	1,00	0,089	9,10	24,72	66,19
Paineira XSBR	0,82	0,052	16,23	0	83,77
Paineira XNBR	0,73	0,024	21,10	0	78,90
Pinus PCM XSBR	1,26	0,051	14,83	28,20	56,97
Pinus Coco XSBR	1,22	0,019	14,86	29,71	55,43
Pinus XSBR	0,98	0,007	33,16	0	66,84
Pinus XNBR	0,98	0,012	39,07	0	60,93

Fonte: Leonardo Seibert Kuhn (2024).

Dessa maneira, a densidade dos bio agregados estiveram de acordo com a densidade das madeiras. Os bio agregados produzidos com madeira de Pinus e PCM, ou óleo de coco apresentaram densidade de aproximadamente 1260 Kg/m³, enquanto os bio agregados somente revestidos apresentaram densidade menor, de aproximadamente 980 Kg/m³.

Os bio agregados produzidos com madeira de Paineira e PCM, ou óleo de coco, apresentaram densidade de aproximadamente 1000 Kg/m³, enquanto somente com revestimento os bio agregados apresentaram densidade aproximada de 730 a 820 Kg/m³.

Quanto a porcentagem das massas dos materiais constituinte dos bio agregados conforme Tabela 5, mais de 50% é revestimento. Para a madeira de Paineira sem PCM o revestimento chega a aproximadamente é de 80%, enquanto com madeira de Pinus é de 66%. Quando contendo PCM a porcentagem de revestimento reduz para 66 e 55% respectivamente para os bio agregados produzidos de Paineira e Pinus. Isso pode ser por possuir mais massa dos outros materiais constituintes e pela capacidade de absorção da borracha pela biomassa, o que não acontece quando presente PCM na biomassa.

A porcentagem de PCM foi maior em bio agregados com madeira de Pinus, com aproximadamente 29%, e 24% com madeira de Paineira, diferente do que se esperava pela densidade da madeira e potencial porosidade, contudo pode ser relacionado com características anatômicas das madeiras. Durante o processo de saturação a porcentagem de PCM na madeira chegou a 60% para a Paineira e 50% para o Pinus.

Uma propriedade relacionada a isso pode ser o efeito de adesão do PCM nas paredes das fibras, a Paineira pode conter maior porosidade, contudo o PCM pode escoar para fora das partículas durante o processo de saturação, quando as partículas são submetidas a escoamento em peneira e papel toalha.

A porcentagem de madeira nos bioagregados é menor quando presente o PCM, e para a madeira de Paineira. Os bio agregados de Paineira contendo PCM apresentaram aproximadamente 9%, sem PCM os valores foram de 16 e 20%, para os bio agregados de Pinus contendo PCM os resultados foram de aproximadamente 14% e sem PCM a porcentagem foi de 33 a 39%.

O revestimento com as diferentes borrachas apresentou uma diferença na porcentagem de madeira e revestimento, XNBR apresentou menor porcentagem de revestimento que o XSBR, tanto para Paineira como Pinus. Isso pode ter ocorrido pelo teor de sólidos de cada borracha, sendo que o XSBR apresenta aproximadamente 50%, e o XNBR aproximadamente 45%.

Wang et al. (2012) (WANG, Y. *et al.*, 2012) produziu microcápsulas contendo PCM, contendo aproximadamente 66% de PCM; (MOHSENI; TANG, W.; WANG, Shanyong, 2019) Mohseni et al. (2019) incorporou PCM na porosidade de resíduos de construção para ser utilizado como agregados leves e reutilizar na construção, o resultado apresentou 24% de PCM no agregado. (MEMON *et al.*, 2015) Memon et al, 2015 incorporou PCM em argila expandida para ser utilizado como agregado e alcançou 70% de PCM.

No entanto, no produto final, o compósito, apresenta um valor de PCM reduzido, não apresentado pelos autores, os resultados de saturação para as duas madeiras, sem considerar o revestimento, teve aproximadamente 60% da massa de PCM com a Paineira e 50% da massa de PCM com o Pinus.

E quando aplicado os bio agregados na matriz cimentícia a porcentagem de massa de PCM se torna menor, como pode ser observado na Tabela 6 os resultados de densidade dos diferentes compósitos, e a porcentagem em massa dos diferentes materiais constituintes, sendo eles, cimento, areia, água e agregado ou bio agregado. Também está descrito a porcentagem em massa dos materiais constituintes dos bio agregados, a madeira, PCM e o revestimento.

A substituição do agregado pelos bio agregados reduz a densidade final do compósito, passando de 2,34 g/cm³ para 1,5 a 1,8 g/cm³ aproximadamente. A porcentagem de massa de cimento, areia e água aumenta quando comparado com o compósito de referência, com brita, isso

é pelo fato dos bio agregados possuírem menor densidade que a brita, no entanto, a substituição foi calculada em volume. Na tabela 4 pode ser observado a proporção dos materiais, sendo unicamente a massa de bio agregados que é alterada.

Como principal material de estudos, pode ser observado a porcentagem de massa de PCM no compósito, apresentando aproximadamente 5 e 7% para os bio agregados produzidos com madeira de Paineira e Pinus, respectivamente. A porcentagem da massa de madeira no compósito foi menor para a madeira de Paineira com aproximadamente 1,9, 2,8 e 3,3, e para o Pinus 3,6, 6,7 e 8%.

Tabela 6: Densidade e porcentagem de massa dos materiais dos diferentes compósitos estudados.

Compósitos	g/cm ³	Cimento (%)	Areia (%)	Água (%)	Agregado (%)	Madeira (%)	PCM (%)	Revestimento (%)
Agregado graúdo	2,34	14,49	37,68	8,70	39,13	-	-	-
Pinus	1,56	20,53	53,37	12,32	13,78	-	-	-
Paineira	1,50	21,99	57,18	13,20	7,63	-	-	-
Paineira PCM XSBR	1,68	18,94	49,23	11,36	20,47	1,94	4,84	13,69
Paineira Coco XSBR	1,69	18,86	49,04	11,32	20,79	1,89	5,14	13,76
Paineira XSBR	1,65	19,59	50,94	11,76	17,70	2,87	-	14,83
Paineira XNBR	1,63	19,98	51,96	11,99	16,07	3,39	-	12,68
Pinus PCM XSBR	1,80	17,87	46,47	10,72	24,94	3,70	7,03	14,21
Pinus Coco XSBR	1,75	18,02	46,86	10,81	24,30	3,61	7,22	13,47
Pinus XSBR	1,68	18,95	49,26	11,37	20,43	6,78	-	13,65
Pinus XNBR	1,67	18,92	49,19	11,35	20,53	8,02	-	12,51

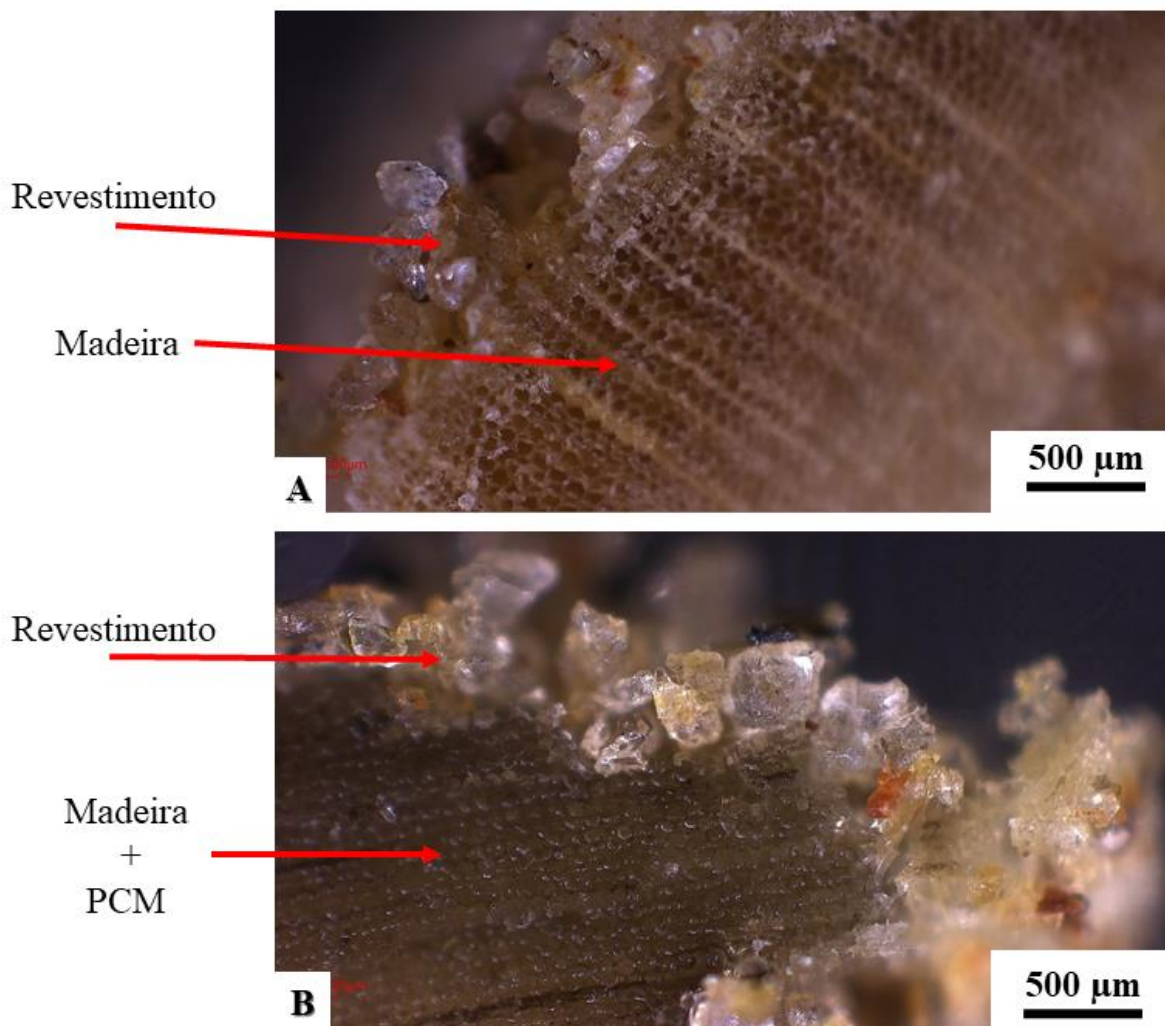
Fonte: Leonardo Seibert Kuhn (2024).

A porcentagem de madeira também foi maior para os bio agregados sem PCM, e também quando encapsulado com a borracha XNBR. A porcentagem de revestimento manteve-se aproximadamente 13 e 14% e foi menor com 12,5% quando utilizado a borracha XNBR para revestimento.

Estudos na área, que utilizaram PCM para aplicação na construção civil apontam que quantidades próximas 5% de PCM em materiais de construção são capazes de promover controle de energética térmica em construções. (ABBASI HATTAN; MADHKHAN; MARANI, 2021; BERARDI; GALLARDO, 2019; MAHDAOUI *et al.*, 2021).

Na Figura 14 pode ser observado o corte transversal dos bio agregados com e sem PCM. Pode ser observado a madeira na secção transversal as suas fibras, sua porosidade e o revestimento formado entorno do bio agregado, constituído pelos cristais de areia e borracha. Este revestimento apresenta uma rugosidade que pode auxiliar na aderência do bio agregado com a matriz cimentícia. O PCM se apresenta na Figura 14B, apresentando um brilho em meio as fibras da madeira.

Figura 14: Imagem microscópica da secção transversal de bio agregado sem PCM (A) e com PCM (B).



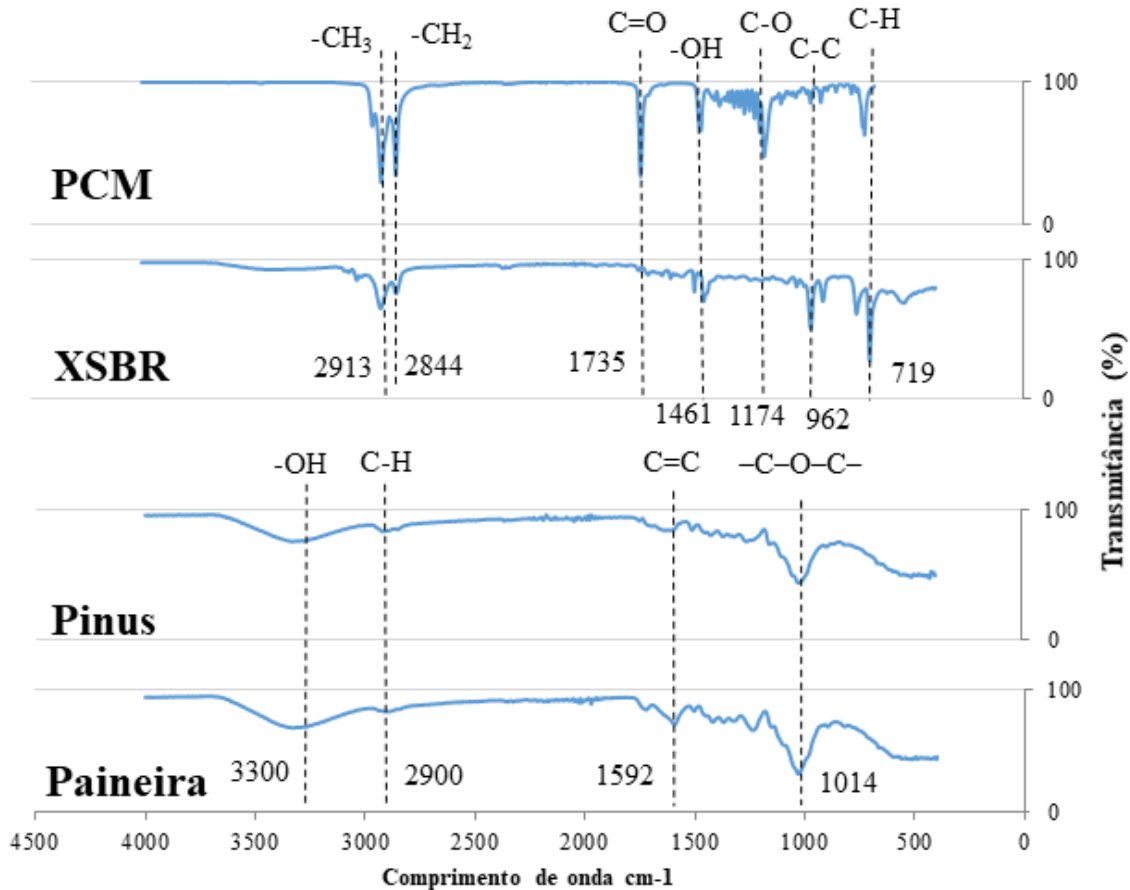
Fonte: Leonardo Seibert Kuhn (2024).

4.2 Espectroscopia Infravermelho de Reflexão Total Atenuada (ATR-IR)

Na Figura 15 está o resultado da análise por infravermelho dos materiais utilizados para produção dos bio agregados. Pode ser observado os resultados para o material de mudança de

estado (PCM), para a borracha de estireno butadieno carboxilada (XSBR) e para as duas madeiras de Pinus e Paineira.

Figura 15: ATR-IR dos materiais utilizados para produção do bioagregado Madeira, PCM e XSBR.



Fonte: Leonardo Seibert Kuhn (2024).

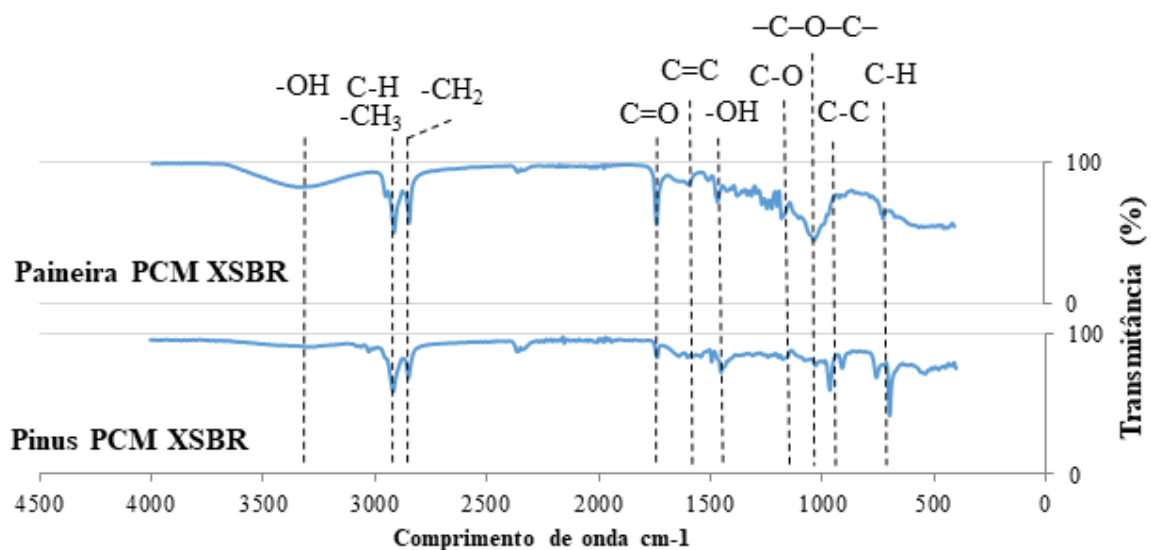
O material de mudança de fase (Crodatherm 24), de acordo com a Figura 15, é caracterizado pelos picos, em 2911 e 2849 cm^{-1} representado por vibração de alongamento simétrico de ligações -CH₃ e -CH₂, o pico em 1735 cm^{-1} representa a vibração de alongamento de ligações duplas de carbono (C=C) em anéis aromáticos, os picos em 1459 e 1175 cm^{-1} representam grupos C-O e C=O com vibração de alongamento simétrico, o pico em 720 cm^{-1} é proporcionado por grupos CH com vibração de flexão (DIXIT *et al.*, 2021; KAYGUSUZ; SALEH, 2021).

O XSBR apresenta picos em 2913, 2844, 1461 e 719 cm^{-1} , encontrados também no PCM, e além desses, possui um em 962 cm^{-1} que representa a ligação de C-C de unidade 1,4 trans butadieno (ROCHA FERREIRA *et al.*, 2020).

Os resultados para as madeiras das duas espécies, Pinus e Paineira (Figura 15), apresentam picos em 3300 e 2900 cm^{-1} representado os grupos vibração de longa simétrico e assimétrico de -OH e C-H, pode ser observado os picos de anéis aromáticos com vibrações de alongamento de C=C em 1592 cm^{-1} , e em 1014 cm^{-1} vibração de -C-O-C- em anel de piranose (GUIMARÃES *et al.*, 2022), resultados similares são encontrados em outros trabalhos que caracterizaram materiais lignocelulósicos por FTIR (HASAN; HORVÁTH; ALPÁR, 2021; KAYGUSUZ; SALEH, 2021).

Os resultados dos bio agregados Paineira PCM XSBR e Pinus PCM XSBR estão apresentados na Figura 16. Todos os picos encontrados nos materiais utilizados para a produção dos bio agregados foram encontrados nos resultados dos bio agregados. Por meio desse resultado pode ser assumido compatibilidade química entre os materiais. Trabalhos futuros serão realizados para avaliações de durabilidade para observar alguma reação química dos materiais.

Figura 16: Resultados da análise ATR-IR dos bioagregados produzidos.



Fonte: Leonardo Seibert Kuhn (2024).

Para facilitar a descrição dos picos encontrados na caracterização por ATR-IR, na Tabela 7 pode ser observado os tipos de vibração e ligações químicas que os picos representam. Alguns

picos encontrados no PCM também foram observados no XSBR, sendo eles em 2913, 2844, 1461 e 720 cm^{-1} .

Tabela 7: Principais frequências e descrição da análise de ATR-IR.

	cm^{-1}	Descrição	REF
PCM	2913-2844	Vibração de alongamento simétrico de -CH ₃ , -CH ₂ e CH.	(KAYGUSUZ; SALEH, 2021)
	1735	Grupos C=O, vibração de alongamento simétrico.	(KAYGUSUZ; SALEH, 2021)
	1461	Vibração de alongamento assimétrico de -OH.	(KAYGUSUZ; SALEH, 2021)
	1174	Vibração de alongamento de C-O	(DIXIT <i>et al.</i> , 2021)
	720	Alongamento plano C-H e C-C saturado	(DIXIT <i>et al.</i> , 2021)
XSBR	962	C-C alongamento 1,4 trans butadiene units	(ROCHA FERREIRA <i>et al.</i> , 2020)
Madeira	3300	Grupos -OH	(GUIMARÃES <i>et al.</i> , 2022)
	2900	C-H alongamento simétrico e assimétrico	(GUIMARÃES <i>et al.</i> , 2022)
	1592	C=C vibração de alongamento em anéis aromáticos	(GUIMARÃES <i>et al.</i> , 2022)
	1014	-C-O-C- pyranose ring vibration	(GUIMARÃES <i>et al.</i> , 2022)

Fonte: Leonardo Seibert Kuhn (2024).

4.3 Análise térmica

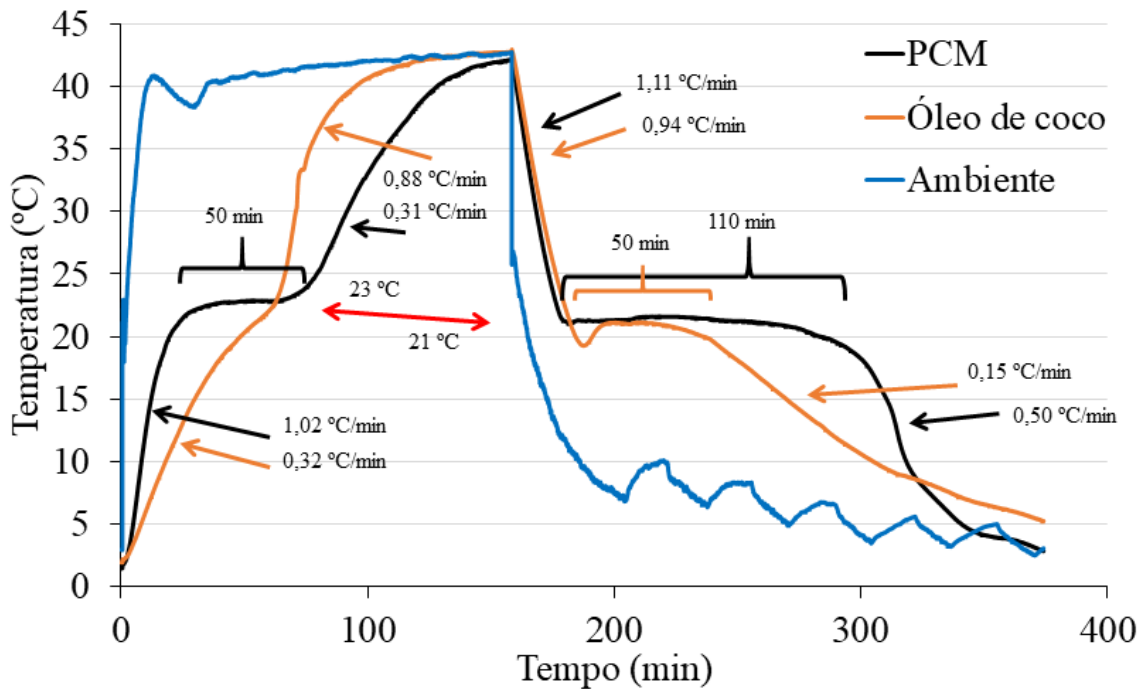
4.3.1 Análise do PCM Crodatherm 24 e Óleo de coco

Os resultados da análise térmica do PCM e o óleo de coco estão apresentados na Figura 17. A temperatura ambiente está representada pela linha azul. Durante a fase de aquecimento a temperatura de equilíbrio é de aproximadamente 42 °C, durante a fase de resfriamento a temperatura de equilíbrio é de aproximadamente 5 °C.

O PCM comercial, Crodatherm 24, apresenta rápida elevação da temperatura de 3 a 21 °C em aproximadamente 24 minutos, com uma velocidade de aquecimento de 1,02 °C/min e então se mantém a 23°C por aproximadamente 50 minutos, sendo este o período de fusão do material. Após a fusão do PCM o material começa a aquecer novamente a uma velocidade de aquecimento de 0,31 °C/min, e alcança a temperatura de equilíbrio, em aproximadamente 75 minutos a 42 °C.

Durante o resfriamento o PCM diminui de temperatura rapidamente até a mudança de estado, de 42 °C até 21°C em 25 minutos, aproximadamente, com uma velocidade de resfriamento a 1,11°C/min. A mudança de estado do PCM perdura por aproximadamente 110 minutos a 21°C (Fig 17B). Após a solidificação o PCM continua a diminuir sua temperatura com uma taxa de resfriamento de 0,50 °C/min até a temperatura de equilíbrio.

Figura 17: Resultado da análise térmica do PCM e óleo de coco.



Legenda: Setas indicam a taxa de aquecimento e temperatura das diferentes fases dos materiais durante o aquecimento e resfriamento.

Fonte: Leonardo Seibert Kuhn (2024).

Durante o aquecimento a temperatura se eleva de 3 a 22 °C em 62 minutos a uma taxa de aquecimento de 0,32 °C/min, aproximadamente. Aos 23°C o óleo de coco apresenta uma mudança em seu aquecimento, passando para uma taxa de aquecimento de 0,88 °C/min, eleva a temperatura até 35 °C em 15 minutos. Após 35 °C a temperatura do óleo de coco tende ao equilíbrio com o ambiente.

Durante o resfriamento do óleo de coco sua temperatura desce rapidamente até 21°C em 30 minutos aproximadamente, sendo uma taxa de resfriamento de aproximadamente de 0,94 °C/min. Durante a mudança de estado, a temperatura se mantém a 21°C por 50 minutos aproximadamente. Após isso, a temperatura do óleo de coco decresce a uma taxa de resfriamento de 0,15 °C/min tendendo ao equilíbrio.

O PCM apresenta uma temperatura de mudança de estado mais definida que o óleo de coco. Também apresentou uma taxa de aquecimento maior no início do aquecimento até a mudança de estado, e durante o resfriamento após a mudança de estado. Durante o resfriamento a mudança de temperatura dos dois materiais se apresentaram muito próximo até a solidificação.

O óleo de coco apresenta uma taxa de aquecimento menor abaixo dos 23°C, podendo estar associada a uma faixa de temperatura sua mudança de estado. Essas diferenças podem ser explicadas pelas características de cada material. O óleo de coco apresenta uma heterogeneidade química, apresentando diversos ácidos graxos, ésteres, entre outros (MARINA *et al.*, 2009). O Crodatherm24 é de origem industrial e possui uma estrutura química mais homogênea, produzido para mudar de estado físico próximo aos 24°C.

Outro fator que explica essas curvas está relacionado com o calor latente e sensível dos materiais. Quanto maior o calor latente do material, maior a energia envolvida no processo de mudança de estado, logo, por mais tempo ele irá manter a mesma temperatura. Conforme a ficha técnica do Crodatherm24 ele possui 183 kJ/kg e calor sensível de 2,4 kJ/kg em estado sólido e 1,7 kJ/kg estado líquido.

Na literatura, outras pesquisas utilizaram o óleo de coco como PCM para construção civil, o qual apresentou calor latente de 107 kJ/kg, e temperatura de fusão entre 20-25 °C e solidificação entre 16-18°C (ALQAHTANI *et al.*, 2020; WONORAHARDJO *et al.*, 2018).

4.3.2 Análise dos Compósitos a base de cimento

Na figura 18 pode-se observar os resultados das análises térmicas dos compósitos de referência e com bio agregados contendo PCM para as duas madeiras, Pinus e Paineira, durante o aquecimento (Fig. 18A) e o resfriamento (Fig. 18B). Como principal resultado o PCM apresentou seu efeito na curva durante sua mudança de estado no aquecimento e no resfriamento. Para facilitar a visualização o início e término da ação do PCM estão indicado por setas nos gráficos.

No início da análise os 3 compósitos apresentam seu aquecimento muito próximo, com uma taxa de aquecimento próximo de 0,7 °C/min. Os dois compósitos com PCM apresentam diminuir a taxa de aquecimento aos 28 minutos, enquanto o compósito de referência continua seu trajeto se curvando até o equilíbrio de temperatura com o ambiente.

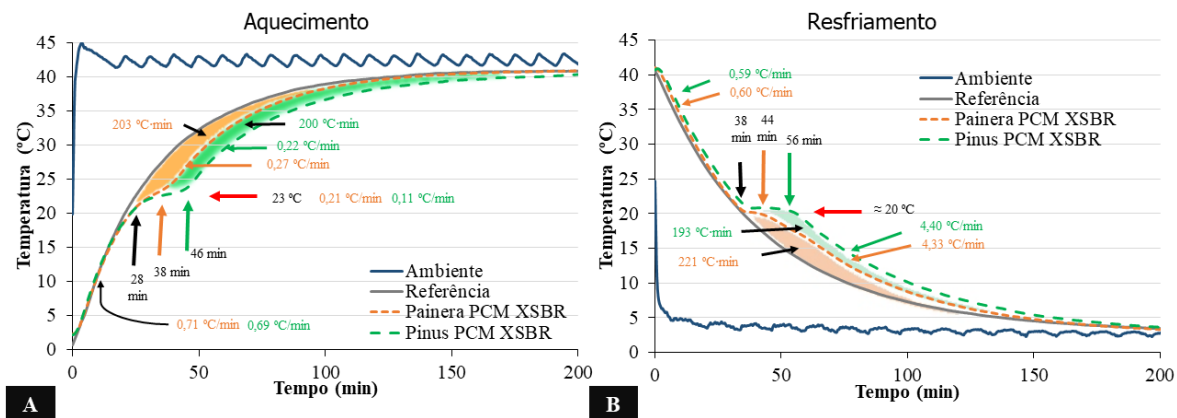
O compósito com bio agregado de Paineira e PCM (tracejado laranja), durante a análise de aquecimento mantém a temperatura por aproximadamente 10 minutos, tendo início aos 28 min

(seta preta) e término aos 38 min (seta laranja). Sua taxa de aquecimento durante esse tempo, de 22 a 24 °C é de 0,21 °C/min.

Após a fusão do PCM a temperatura volta a se elevar, a uma taxa de aquecimento de 0,27 °C/min, e então se estende até a temperatura de equilíbrio. A diferença da área (Fig 18 A, área em laranja) da curva da referência para a curva do compósito com esse bio agregado de Paineira apresentou 203 °C·min.

O compósito com bio agregado de Pinus e PCM (tracejado verde), mantém a temperatura por aproximadamente 18 minutos durante a análise aquecimento, tendo início aos 28 min (seta preta) e término aos 46 min (seta verde), e uma taxa de aquecimento de 0,11°C/min durante a fusão do PCM.

Figura 18: Análise térmica dos compósitos com bio agregados com PCM para as madeiras de Pinus e Paineira das amostras durante o aquecimento (A) e resfriamento (B).



Legenda: Setas indicam tempo (min), temperatura (°C), Taxa de aquecimento (°C/min) e área (°C·min).
Fonte: Leonardo Seibert Kuhn (2024).

Após a fusão a temperatura começa a aumentar novamente com uma taxa de aquecimento de 0,22 °C/min, e se estende até a temperatura de equilíbrio. A área verde (Fig 18 A) da curva do bio agregado de paineira com pcm (Linha laranja tracejada) para a curva do compósito com bio agregado de Pinus (Linha verde tracejada) apresentou 200 °C·min. Em relação ao compósito de referência a área de atraso é de 403 °C·min.

Durante a análise de resfriamento (Fig. 18B) os 3 compósitos apresentam uma taxa de resfriamento muito próxima, de aproximadamente 0,6 °C/min. A ação do PCM teve início aos 38 minutos e próximo aos 20 °C. O compósito de referência, sem PCM, continua seu resfriamento que tende ao equilíbrio de temperatura com o ambiente.

O compósito com bio agredado de Paineira e PCM (tracejado laranja), mantém a temperatura por aproximadamente 6 minutos durante a análise de resfriamento, tendo início aos 38 min (seta preta) e término aos 44 min (seta laranja), apresentando uma taxa de aproximadamente $0,13\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

Após a solidificação do PCM a temperatura começa a diminuir novamente a uma taxa de aproximadamente $0,23\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, e se estende até a temperatura de equilíbrio. A área de atraso do resfriamento (Área em laranja Fig. 18B) representa $221\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}$.

O compósito com bio agredado de Pinus e PCM (tracejado verde), mantém a temperatura por aproximadamente 18 minutos durante o resfriamento, tendo início aos 38 min (seta preta) e término aos 56 min (seta verde), a uma taxa de $0,08\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

Após a solidificação do PCM a temperatura começa a diminuir novamente a uma taxa de $0,22\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, e se estende até a temperatura de equilíbrio com o ambiente. A área demarcada em verde na Fig.18B representa $193^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}$.

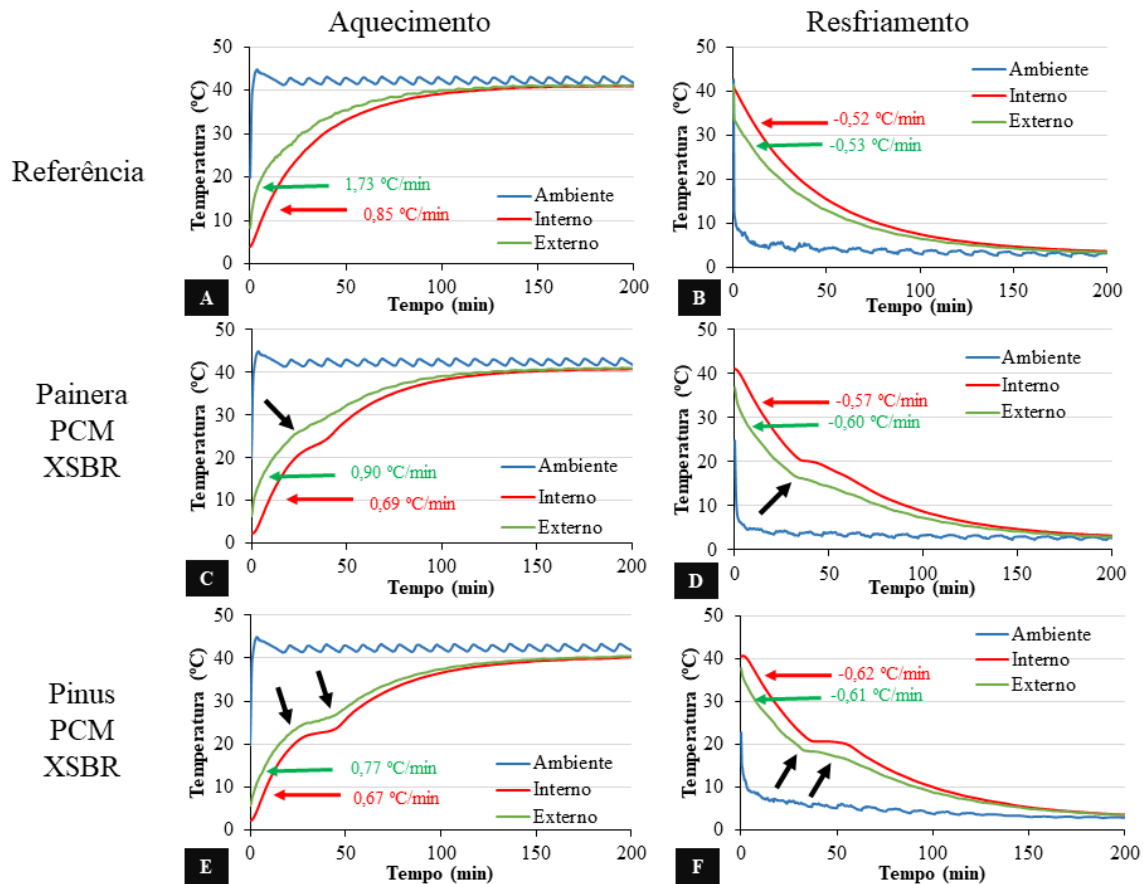
O efeito do PCM pode ser observado na temperatura da superfície das amostras, na Figura 19 estão os resultados da performance térmica dos compósitos de referência (A e B), com madeira de Paineira (C e D) e com madeira de Pinus (E e F).

As temperaturas interna e externa dos compósitos apresentam um distanciamento, isso ocorre, pois, a temperatura superficial troca de calor rapidamente com o ambiente, assim, as temperaturas iniciais dos compósitos apresentam uma diferença de temperatura que pode ter ocorrido no momento inicial da análise onde que em poucos segundos a temperatura externa do compósito já elevou enquanto internamente a temperatura ainda não sofreu alteração.

Para o compósito de referência sob aquecimento (Fig. 19A) o tempo necessário para atingir a temperatura de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ é de 6,3 minutos externamente e de 17,6 minutos internamente, resultando em uma discrepância de 11,3 minutos para alcançar a igualdade térmica. Aos $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, observa-se uma redução na diferença de tempo, para 3,4 minutos.

As taxas de aquecimento das temperaturas internas e externas de 10 a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ foram de $0,85$ e $1,73\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ respectivamente.

Figura 19: Análise térmica dos compósitos com bio agregados com PCM para as madeiras de Pinus e Paineira.



Fonte: Leonardo Seibert Kuhn (2024).

No processo de resfriamento do compósito de referência (Figura 19B), foi observado que as amostras atingiram a temperatura de 30 °C em 4 minutos externamente e em 13,3 minutos internamente, resultando em uma diferença de 9,3 minutos entre os dois locais. Para atingir a temperatura de 20 °C, o tempo necessário foi de 22,4 minutos externamente e 32 minutos internamente, registrando uma diferença de 9,6 minutos entre as temperaturas externa e interna. As taxas de resfriamento das temperaturas internas e externas de 35 a 25 °C foram de -0,57 e -0,60 °C/min respectivamente.

Para o compósito de Paineira PCM XSBR na Figura 19 (C e D) pode ser observado as setas indicando o início e término da mudança de estado do PCM durante a análise térmica.

No entanto, é importante notar que o efeito na temperatura externa exibe uma menor representatividade, manifestando-se como uma mudança na taxa de aquecimento ou resfriamento, indicada apenas por uma seta. Durante o processo de aquecimento (Figura 19C), o ponto indicado

atinge os 26 °C em um intervalo de 26 minutos. A diferença temporal entre a temperatura externa e a temperatura interna aos 24 °C é de aproximadamente 20 minutos. As taxas de aquecimento para as temperaturas interna e externa de 10 a 20°C foram de 0,69 e 0,90 °C/min.

Durante o resfriamento do compósito com Paineira PCM XSBR (Figura 19D), o ponto representado pela seta na temperatura externa atinge os 36 °C em 36 minutos. Durante o resfriamento, a diferença também se mantém em cerca de 20 minutos, porém em uma temperatura ligeiramente mais baixa, aos 19 °C. As taxas de resfriamento para as temperaturas interna e externa de 35 a 25°C foram de -0,57 e -0,60 °C/min.

Para o compósito de Pinus PCM XSBR pode ser observado os resultados da temperatura externa e interna na Figura 19 E e F, as setas indicam a mudança de estado do PCM. A performance indicada pelas setas da temperatura externa durante a análise apresenta um platô durante o aquecimento e o resfriamento.

No aquecimento (Fig 19E) a primeira mudança de inclinação ocorre próximo aos 25°C aos 29,3 minutos, a segunda ocorre a 26,8 °C aos 44,6 minutos aproximadamente, apresentando um atraso de aproximadamente 15 minutos. As taxas de aquecimento para as temperaturas interna e externa de 10 a 20°C foram de 0,67 e 0,77 °C/min.

Na análise de resfriamento (Fig. 19G) a primeira mudança de fase da temperatura externa ocorre aos 18,5 °C aos 33 minutos, a segunda ocorre aos 16,8 °C e 52 minutos, apresentando um atraso de aproximadamente 19 minutos. As taxas de resfriamento para as temperaturas interna e externa de 35 a 25°C foram de -0,62 e -0,61 °C/min.

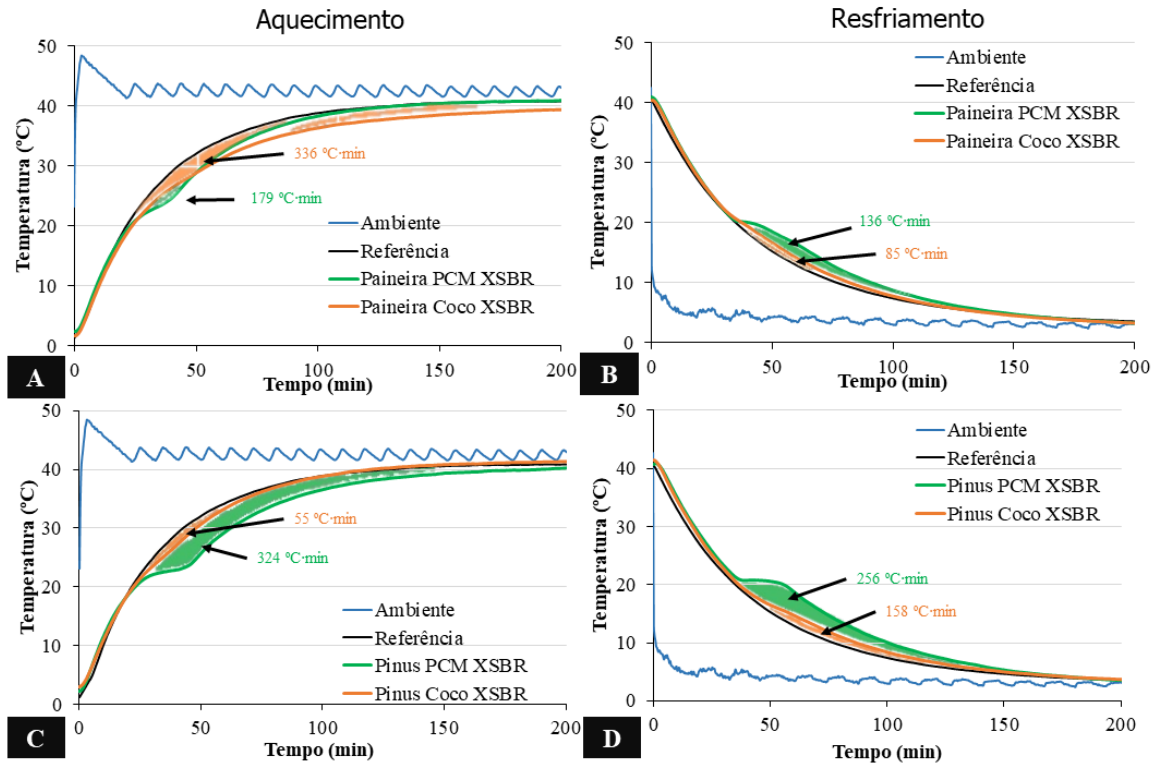
Em comparação com o PCM Crodatherm 24, na Figura 20 pode ser observado os resultados das análises térmicas dos compósitos com bio agregados produzidos com óleo de coco, o qual possui mudança de estado próximo a temperatura ambiente e potencial de alternativa.

O resultado da análise térmica durante o aquecimento para os compósitos com bio agregado de Paineira e óleo de coco (Fig. 20A) apresenta um atraso do aquecimento em comparação com a referência, indicado pela seta, foi registrado aos 25°C os tempos de 30,6, 35,6 e 41,33 minutos para os compósitos de referência, com óleo de coco e PCM, respectivamente. A área em laranja representa 336 °C·min.

Durante o resfriamento (Fig. 20B) os compósitos marcaram 18°C aos tempos de 40,66, 44,66 e 52,33 minutos para os compósitos de referência, com óleo de coco e PCM

respectivamente. O óleo de coco apresentou atraso de 5 minutos durante o aquecimento e 4 minutos durante o resfriamento. A área em laranja foi de $85\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}$.

Figura 20: Análise térmica dos compósitos com bio agregados contendo PCM e óleo de coco durante aquecimento e resfriamento com madeira de Pinus e Paineira.



Fonte: Leonardo Seibert Kuhn (2024).

Os resultados para os bio agregados de Pinus também apresentaram bons resultados com a utilização do óleo de coco. Durante o aquecimento (Fig. 20C), o compósito com bio agregado de Pinus com óleo de coco apresentou atraso de 4 minutos, para alcançar $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, enquanto o PCM apresentou atraso de 18 minutos, em relação ao compósito de referência. A área em laranja representou $55\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}$.

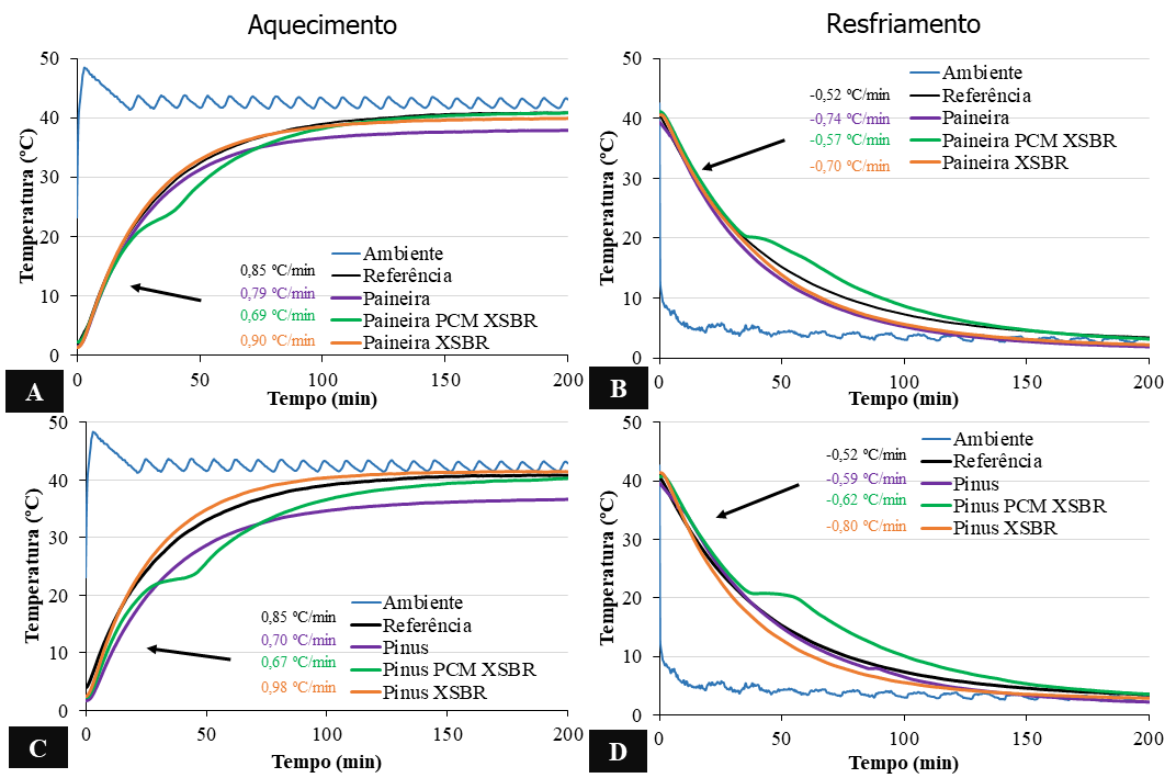
O compósito com bio agregado de madeira de Pinus e óleo de coco na análise de resfriamento (Fig. 20D) apresentou atraso da temperatura, contudo em temperatura de $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, o qual apresentou atraso de 7 minutos, em comparação, o compósito com PCM a $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ apresentou atraso de 22 minutos. A área proporcionada foi de $158\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}$ durante o resfriamento.

Os compósitos com óleo de coco apresentaram a mudança de estado em temperatura diferente ao PCM. Os compósitos contendo PCM apresentam ocorrer a $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante o

aquecimento e 20°C durante o resfriamento, enquanto o óleo de coco apresentou aos 25 °C durante o aquecimento e 18 °C com a madeira de Paineira e 15 °C com a madeira de Pinus.

Os resultados da análise térmica dos compósitos contendo os bio agregados de partículas de madeira (Paineira e Pinus), as partículas somente encapsuladas com borracha (Paineira XSBR e Pinus XSBR) e os bio agregados contendo PCM (Paineira PCM XSBR e Pinus PCM XSBR) e referência estão na Figura 21.

Figura 21: Avaliação térmica dos diferentes tratamentos somente com partículas de madeira, partículas revestidas com borracha os bio agregados em comparação com o compósito de referência.



Fonte: Leonardo Seibert Kuhn (2024).

Os resultados de aquecimento dos compósitos com madeira de Paineira (Fig 21A) apresentaram uma pequena variação, de aproximadamente 1 minuto aos 15 °C. O tempo em que atingiram 15°C é de 14 minutos para os compósitos de referência e Paineira XSBR, e de 15 minutos para os compósitos para os compósitos Paineira e Paineira PCM XSBR.

As taxas de aquecimento de 10 a 20 °C para os 4 compósitos foram de 0,85, 0,79, 0,69 e 0,90 °C/min, respectivamente para o compósito de referência, paineira, paineira PCM XSBR e Paineira XSBR.

A temperatura de equilíbrio, aos 180 minutos foi de 40,81, 37,81, 40,73 e 39,82 para os compósitos Referência, Paineira, Paineira PCM XSBR e Paineira XSBR, respectivamente. A média da temperatura ambiente foi de 41,41 °C.

Durante o resfriamento dos compósitos com madeira de Paineira (Fig. 21B), aos 25°C o tempo registrado para cada compósito foi de 23, 21, 24 e 22 minutos, respectivamente para a referência, Paineira, Paineira PCM XSBR e Paineira XSBR. Essa diferença apresenta um máximo de 3 minutos entre os compósitos.

As taxas de resfriamento de 35 a 25 °C para os compósitos foram de -0,52, -0,74, -0,57 e -0,70 °C/min para os compósitos de referência, Paineira, Paineira PCM XSBR e Paineira XSBR, respectivamente.

A temperatura de equilíbrio durante o resfriamento (Fig. 21B) com o ambiente aos 180 minutos, foi registrado com temperatura de 3,82, 2,17, 3,69 e 2,43 °C para os compósitos de referência, Paineira, Paineira PCM XSBR e Paineira XSBR, respectivamente. A temperatura média do ambiente foi de 3°C.

Os resultados para os compósitos com madeira de Pinus durante o aquecimento (Fig. 21C) apresentaram 15 °C ao tempo de 15, 17, 14 e 12 minutos para os compósitos de referência, Pinus, Pinus PCM XSBR e Pinus XSBR respectivamente, uma amplitude de 5 minutos entre os compósitos.

As taxas de aquecimento de 10 a 20 °C para os compósitos foram de 0,85, 0,70, 0,67 e 0,98 °C/min para os compósitos de referência, Pinus, Pinus PCM XSBR e Pinus XSBR, respectivamente.

As temperaturas de equilíbrio em 180 minutos foram 40,79, 36,49, 39,93 e 41,38 °C para os compósitos de referência, Pinus, Pinus PCM XSBR e Pinus XSBR respectivamente, a temperatura média do ambiente foi de 42,40 °C.

Durante o resfriamento os resultados com madeira de pinus (Fig. 21D) registraram 25 °C aos 23, 25, 26 e 21 minutos para os compósitos de referência, Pinus, Pinus PCM XSBR e Pinus XSBR respectivamente, tendo uma variação de 5 minutos. As taxas de resfriamento de 35 a 25 °C foram de -0,52, -0,59, -0,62 e -0,80 °C/min para os compósitos de referência, Pinus, Pinus PCM XSBR e Pinus XSBR, respectivamente.

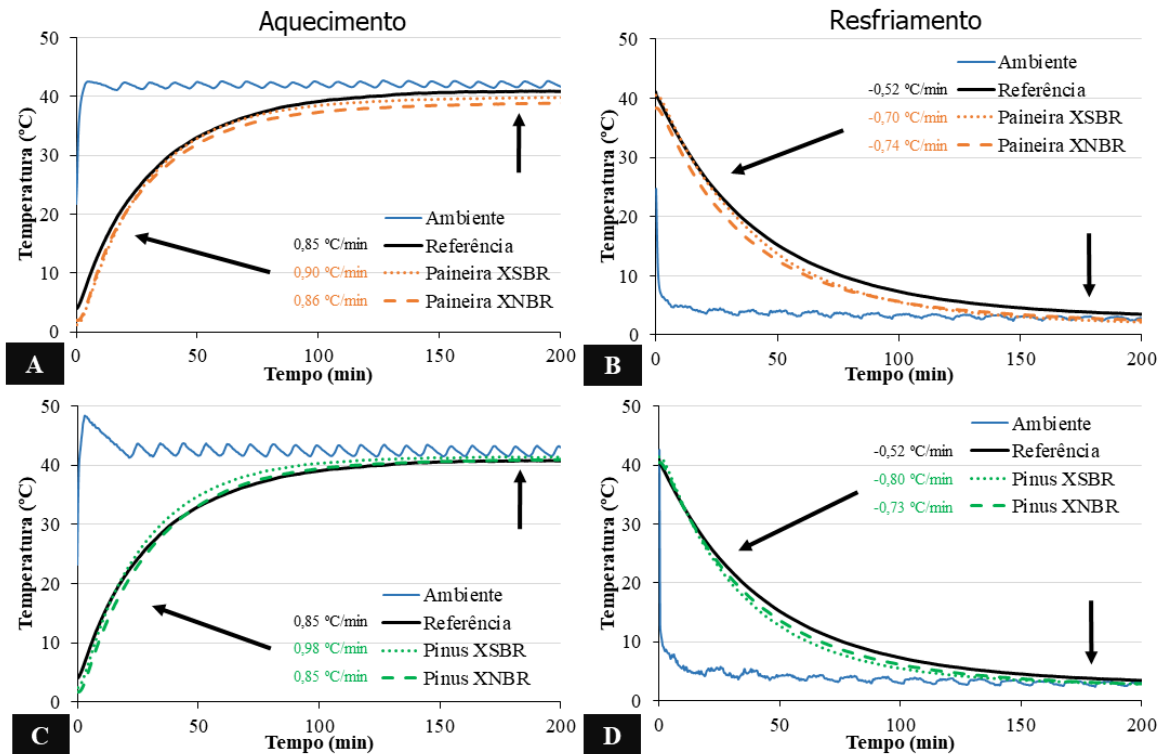
A temperatura registrada em 180 minutos para os compósitos foi de 3,80, 2,60, 4,14 e 3,00 °C, para os compósitos de referência, Pinus, Pinus PCM XSBR e Pinus XSBR respectivamente.

Para estudos de avaliar o potencial da borracha de acrilonitrilo butadieno carboxilado (XNBR) os resultados da análise térmica em comparação com a borracha de estireno butadieno carboxilado (XSBR) estão na Figura 22.

Pode-se observar o comportamento dos compósitos com madeira de Paineira durante o aquecimento (Fig. 22A) seguem próximo à curva de referência, os tempos para chegar a 20°C foram de 18 minutos para o compósito de referência e 20 min para os compósitos com Paineira XSBR e Paineira XNBR. A temperatura de equilíbrio em 180 minutos foi de 40,80, 39,81 e 38,70 °C para os respectivos compósitos, referencia, Paineira XSBR e Paineira XNBR.

Fonte: Leonardo Seibert Kuhn (2024).

Figura 22: Resultados da análise térmica para os tratamentos com bio agregados encapsulados com XSBR e XNBR.



As Taxas de aquecimento de 10 a 20°C para os compósitos Paineira XSBR e Paineira XNBR foi de 0,90 e 0,86 °C/min. Enquanto para o resfriamento de 35 a 25 °C foi de -0,70 e -0,74 °C/min.

Durante o resfriamento dos compósitos com Paineira XSBR e XNBR (Fig. 22B) os tempos registrados quando alcançaram 20°C foram 35, 32 e 28 minutos para os respectivos compósitos, referencia, Paineira XSBR e Paineira XNBR. Em 180 minutos as temperaturas registradas para os compósitos foram de 3,82, 2,43 e 2,76 °C.

Os resultados da análise térmica com a madeira de Pinus e as diferentes borrachas durante o aquecimento (Fig. 22C) em 17 min os compósitos de referência e Pinus XSBR marcam 20 °C, e o compósito de Pinus XNBR marca 20°C em 20 minutos. A temperatura de equilíbrio em 180 minutos é de 40,80, 41,38 e 40,89 °C para a referência, Pinus XSBR e XNBR respectivamente.

As taxas de aquecimento para os compósitos de Pinus XSBR e Pinus XNBR de 10 a 20 °C foram de 0,98 e 0,85 °C/min. Durante o resfriamento, a taxa de 35 a 25 °C foi de -0,80 e -0,73 °C/min.

No processo de resfriamento os compósitos de referência, Pinus XSBR e XNBR (Fig. 22D) os respectivos tempos registrados para alcançar 20 °C foram de 35, 29 e 31 minutos. Suas temperaturas de equilíbrio em 180 minutos foram respectivamente de 3,82, 3,00 e 3,14 °C.

As características que podem influenciar na eficiência energética, performance térmica de cada compósito, proporcionando algumas diferenças entre os compósitos estão atribuídas a quantidade de massa de cada material do compósito, calor latente dos materiais de mudança de estado e condutividade térmica.

O melhor controle de temperatura do compósito com bio agregado de Pinus com PCM pode estar relacionado com porcentagem de massa de PCM. O bio agregado de Pinus apresentou aproximadamente 7% de PCM na massa final do compósito, enquanto o bio agregado de Paineira apresentou 5%.

Os resultados obtidos neste estudo apresentam comportamento semelhante quando comparado com os estudos realizados por Mankel et al., (MANKEL *et al.*, 2021; MANKEL; CAGGIANO; KOENDERS, E., 2019) os quais utilizaram a mesma metodologia de análise térmica por esferas.

Outros estudos avaliaram o efeito do PCM sob diferentes metodologias para aplicação na construção civil, mostrando como efetivamente seu resultado afeta na temperatura, diminuindo a amplitude térmica diária. Como exemplo prático, a temperatura do dia pode variar de 15 a 30 °C, com a utilização do PCM a temperatura interna de uma construção pode variar apenas de 20 a 25

°C (ABBASI HATTAN; MADHKHAN; MARANI, 2021; MAHDAOUI *et al.*, 2021; ZHAN *et al.*, 2023).

A utilização do óleo de coco mostrou efetividade, contudo em menor proporção que o PCM industrial. Pode ser viável sua utilização como PCM, contudo, outros fatores devem ser avaliados como a quantidade necessária em uma construção e custo de aplicação.

Na literatura, algumas pesquisas que avaliaram o óleo de coco apresentaram resultado de calor latente de 107 kJ/kg. No entanto, a mudança de estado se amplia a uma faixa de temperatura, sua fusão entre 20-25 °C e solidificação entre 16-18°C. Isso pode ser explicado pela composição química, que contém diversos ácidos, como caprílico, cáprico, láurico, palmítico, entre outros (ALQAHTANI *et al.*, 2020; WONORAHARDJO *et al.*, 2018). Enquanto o PCM industrial apresenta calor latente de 183 KJ/Kg e uma mudança de estado físico mais específica.

Outra propriedade fundamental dos materiais nessa avaliação é a condutividade térmica. Cada material possui uma resposta diferente, e sendo um compósito, resulta da interação dos diferentes materiais.

De acordo com Mason et al, 2016 (MASON *et al.*, 2016) a madeira de diferentes espécies possuem condutividades térmicas distintas, além disso, a direção das fibras também pode influenciar. Madeiras com baixa densidade de 0,13 g/cm³ apresentaram 0,015 W/mK perpendicular a direção das fibras, madeira mais densa com 0,71 g/cm³ apresentaram 0,150 W/mK perpendicular as fibras e 0,419 W/mK paralelamente as fibras.

Quanto a borracha, possui baixa condutividade térmica, com aproximadamente 0,09 W/mK. Em algumas pesquisas essa característica pode ser alterada com adição de materiais com alta condutividade térmica, como nanotubos de carbono, óxido de zinco, óxido de alumínio, sílica, entre outros (MA, H. *et al.*, 2021; ZHANG, Y.; CHOI; PARK, 2018).

As argamassas avaliadas por Mankel et al. 2019 (MANKEL *et al.*, 2019) (2019 e 20) contendo PCM apresentaram condutividade térmica de 0,46 a 0,64 W/mK, e as argamassas de referência variaram de 0,58 a 0,73 W/mK. O trabalho contendo agregados reciclados com PCM apresentaram condutividade térmica de 0,72 a 0,84 W/mk (MANKEL; CAGGIANO; KOENDERS, E., 2019).

Outros trabalhos avaliaram o efeito de agregados leves na condutividade térmica de concretos, a condutividade térmica dos compósitos de referência apresentou uma variação de 1,2 a 1,6 W/mk. A adição de agregados leves reduziu a condutividade térmica, para

aproximadamente 0,8 W/mk. Outros fatores como volume de agregado, densidade do agregado, teor de umidade e porosidade influenciaram na condutividade térmica (ASADI *et al.*, 2018; REAL *et al.*, 2021; SARGAM; WANG, K.; ALLEMAN, 2020).

4.4 Análise mecânica dos Compositos a base de cimento

Pode ser observado os resultados do ensaio de flexão para os diferentes compósitos na Tabela 8. Estão apresentados os valores médias do módulo de ruptura (MOR) e módulo de flexão (MOE), e os respectivos desvios padrão (DesvPad) e coeficiente de variação (CV%).

O compósito de referência apresentou os maiores valores de MOR e MOE, sendo de 5,72 e 668,20 MPa respectivamente. Para o MOR o DesvPad. é de 0,72 MPa e CV de 12,59 %, o MOE apresentou DesvPad de 123,29 MPa e CV de 18,45%.

Tabela 8: Médias, desvio padrão (DesvPad) e coeficiente de variação (CV%) dos resultados das análises de modulo de elasticidade (MOE) e modulo de ruptura (MOR) do ensaio de flexão.

Agregado	MOR			MOE		
	MPa	DesvPad	CV%	MPa	DesvPad	CV%
Brita	5,72	0,72	12,59	668,20	123,29	18,45
Pinus	2,54	0,48	18,87	230,19	166,20	72,20
Paineira	0,57	0,11	18,58	72,88	17,45	23,94
Paineira PCM XSBR	0,78	0,09	11,65	121,54	91,30	75,12
Paineira Coco XSBR	1,09	0,22	20,05	111,77	25,66	22,96
Paineira XSBR	1,46	0,39	26,94	189,59	134,79	71,09
Paineira XNBR	0,29	0,02	8,12	55,37	32,41	58,53
Pinus PCM XSBR	2,48	0,15	6,17	241,78	184,71	76,39
Pinus Coco XSBR	1,98	0,09	4,47	421,88	9,93	2,35
Pinus XSBR	2,27	0,08	3,50	237,15	164,20	69,24
Pinus XNBR	2,16	0,09	3,95	225,86	175,79	77,83

Fonte: Leonardo Seibert Kuhn (2024).

Os compósitos com madeira de Paineira apresentaram MOR de 0,29 a 1,46 MPa e MOE de 55 a 189 MPa. O desvio padrão para o MOR variou de 0,02 a 0,39 MPa e o CV de 8 a 26 %. Para o MOE o desvio padrão variou de 17 a 134 MPa e o CV de 22 a 75%.

Os compósitos com madeira de Pinus apresentaram MOR de 1,98 a 2,54 MPa e MOE de 225 a 421 MPa. O desvio padrão para o MOR variou de 0,08 a 0,48 MPa e o CV de 3 a 18 %. Para o MOE o desvio padrão variou de 9 a 184 MPa e o CV de 2 a 72%.

O compósito que apresentou maior MOR foi aquele com bio agregado de Pinus, seguido de Pinus PCM XSBR, com 2,54 e 2,48 MPa respectivamente. No entanto, o coeficiente de variação apresentou valores elevados para a maioria dos compósitos. Para o módulo de ruptura os valores de CV foram menores, alcançando até 26,94%. Os compósitos com bio agregados de Pinus PCM, Coco, XSBR e XNBR apresentaram os menores CV%.

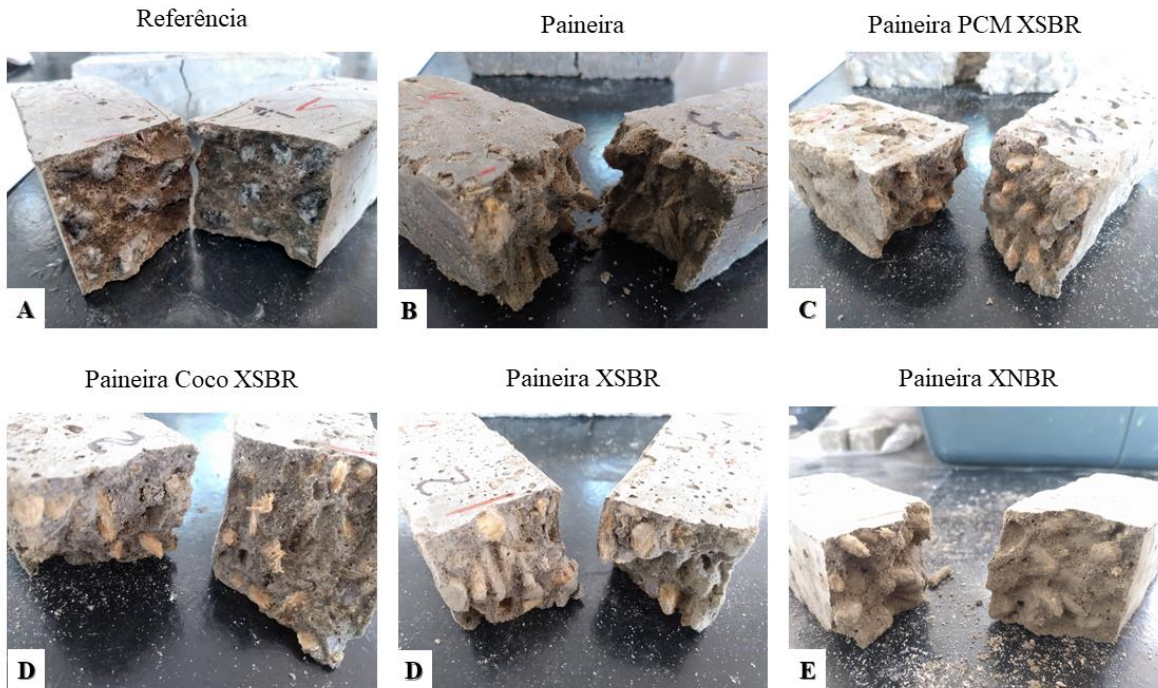
O módulo de elasticidade apresentaram elevados CV%, apenas um compósito apresentou 2,35%, o compósito com bio agregado de Pinus Coco XSBR. Os demais compósitos apresentaram CV de 18,45% até 77,83%.

Nas Figuras 23 e 24 pode ser observado o rompimento das amostras para todos os compósitos resultante do ensaio de flexão. O rompimento apresentou ser adequado ao tipo de ensaio, apresentando a fissura no centro da amostra.

Na figura 23 estão o resultado do compósito de referência (Fig 23A), a brita como agregado apresenta boa ligação refletindo na resistência mecânica, e em alguns casos o agregado se apresentou rompido. Os demais compósitos com madeira de paineira (Fig 23B-E) apresentaram menor resistência mecânica e o rompimento ocorreu na interface entre bio agregados e matriz, em alguns casos no revestimento.

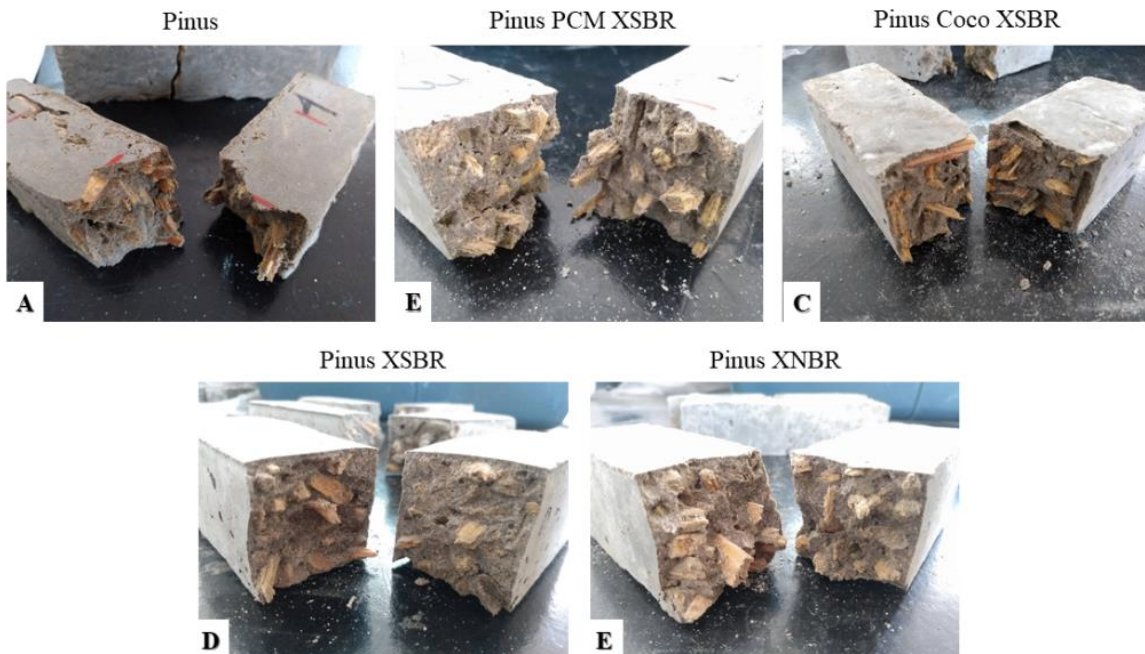
Na Figura 24 estão os resultados dos bio agregados com madeira de Pinus, estes apresentaram resistência mecânica maior que aqueles com madeira de Paineira. Contudo, o modo de rompimento foi similar aos compósitos com madeira de Paineira.

Figure 23: Imagens do rompimento das amostras dos diferentes compósitos estudados com bio agregados de Paineira após ensaio de tração na flexão.



Fonte: Leonardo Seibert Kuhn (2024).

Figure 24: Imagens do rompimento das amostras dos diferentes compósitos estudados com bio agregados de Pinus após ensaio de tração na flexão.

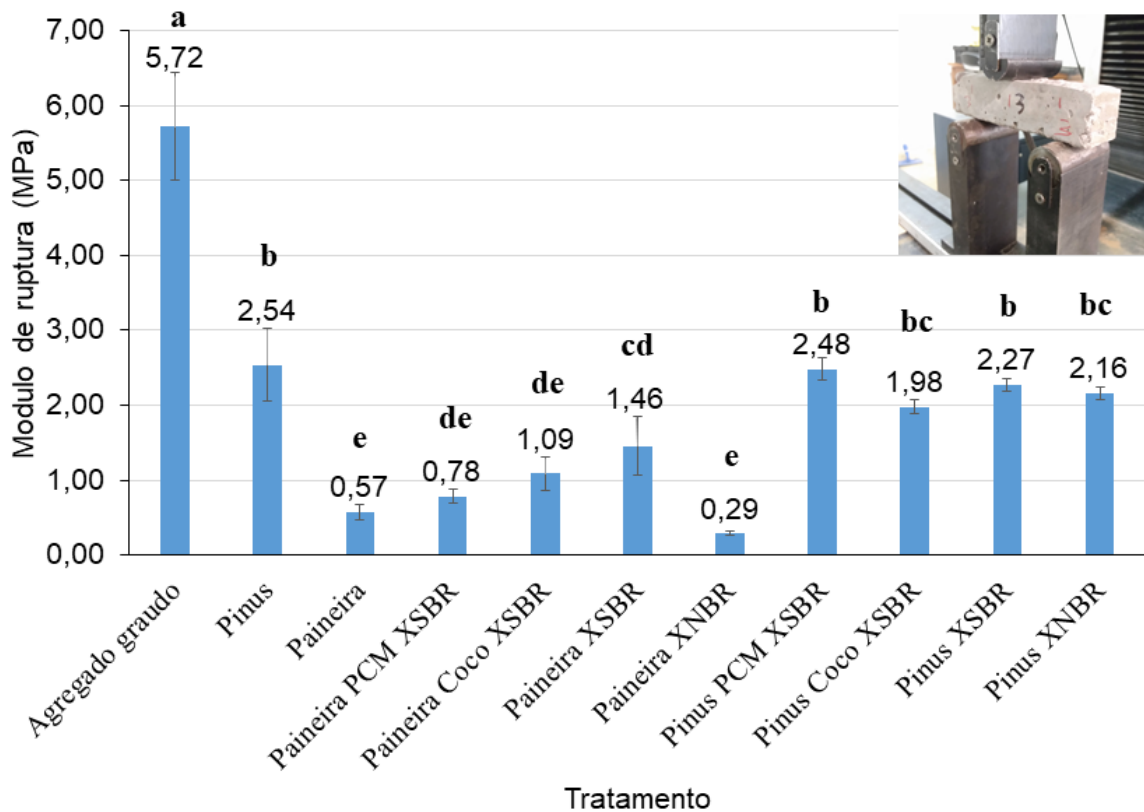


Fonte: Leonardo Seibert Kuhn (2024).

Os resultados da análise estatística das médias do módulo de ruptura do ensaio de flexão estão apresentados na Figura 25. Por estes resultados pode se observar que os compósitos com bio agregados diferem-se entre as madeiras utilizadas para cada compósito.

No estudo, foi observada uma diferença estatisticamente significativa entre o compósito de referência e todos os compósitos que incorporaram bio agregados. Os compósitos utilizando bio agregados de madeira de Pinus não demonstraram divergências estatisticamente relevantes entre si. No entanto, houve variações estatisticamente significantes entre os compósitos que empregaram bio agregados de madeira de Paineira.

Figura 25: Resultados da análise estatística pelo teste de tukey das médias do módulo de ruptura do ensaio de flexão para os diferentes tratamentos.



Legenda: Letras diferentes para diferença significativa pelo teste de Tukey.

Fonte: Leonardo Seibert Kuhn (2024).

No contexto deste estudo, o compósito utilizando bio agregado de Paineira XSBR apresentou uma média de 1,46 MPa. Este compósito foi o único entre os que utilizaram madeira de Paineira que não apresentou diferença estatisticamente significativa em relação a dois compósitos com madeira de Pinus, nomeadamente Pinus óleo de coco e Pinus XNBR. Além disso, não demonstrou diferença estatisticamente significativa em comparação com os

compósitos Paineira PCM XSBR e Paineira Coco XSBR. No entanto, houve distinção estatisticamente significativa em relação aos compósitos Paineira e Paineira XNBR, os quais exibiram as menores médias de resistência, registrando 0,57 MPa e 0,29 MPa, respectivamente.

Os resultados do ensaio de compressão estão descritos na Tabela 9. O resultado da referência apresentou os maiores valores de tensão máxima e módulo de elasticidade em comparação com os demais compósitos, sendo de 13,90 e 872,39 MPa respectivamente.

Tabela 9: Médias, desvio padrão (DesvPad) e coeficiente de variação (CV%) dos resultados das análises de módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR) do ensaio de compressão.

Agregado	Tensão máxima			Módulo de elasticidade		
	MPa	DesvPad	CV%	MPa	DesvPad	CV%
Brita	13,90	0,80	5,72	872,39	374,14	42,89
Pinus	2,84	0,68	23,79	199,82	48,93	24,49
Paineira	0,72	0,09	12,67	71,06	34,18	48,10
Paineira PCM XSBR	1,31	0,39	29,60	91,50	27,67	30,24
Paineira Coco XSBR	1,71	0,46	26,99	184,19	147,89	80,29
Paineira XSBR	2,28	0,62	27,04	269,14	160,19	59,52
Paineira XNBR	0,63	0,17	26,99	17,51	10,24	58,48
Pinus PCM XSBR	3,13	0,70	22,34	205,36	121,14	58,99
Pinus Coco XSBR	2,76	0,51	18,45	268,85	69,63	25,90
Pinus XSBR	3,45	0,92	26,77	154,45	108,35	70,16
Pinus XNBR	3,56	0,80	22,37	186,45	114,50	61,41

Fonte:
Leonar
do
Seibert
Kuhn
(2024)
De
modo
geral
os bio

agregados reduziram a resistência mecânica do compósito. O bio agregado com madeira de Pinus apresentou maior resistência em comparação com os bio agregados de madeira de Paineira.

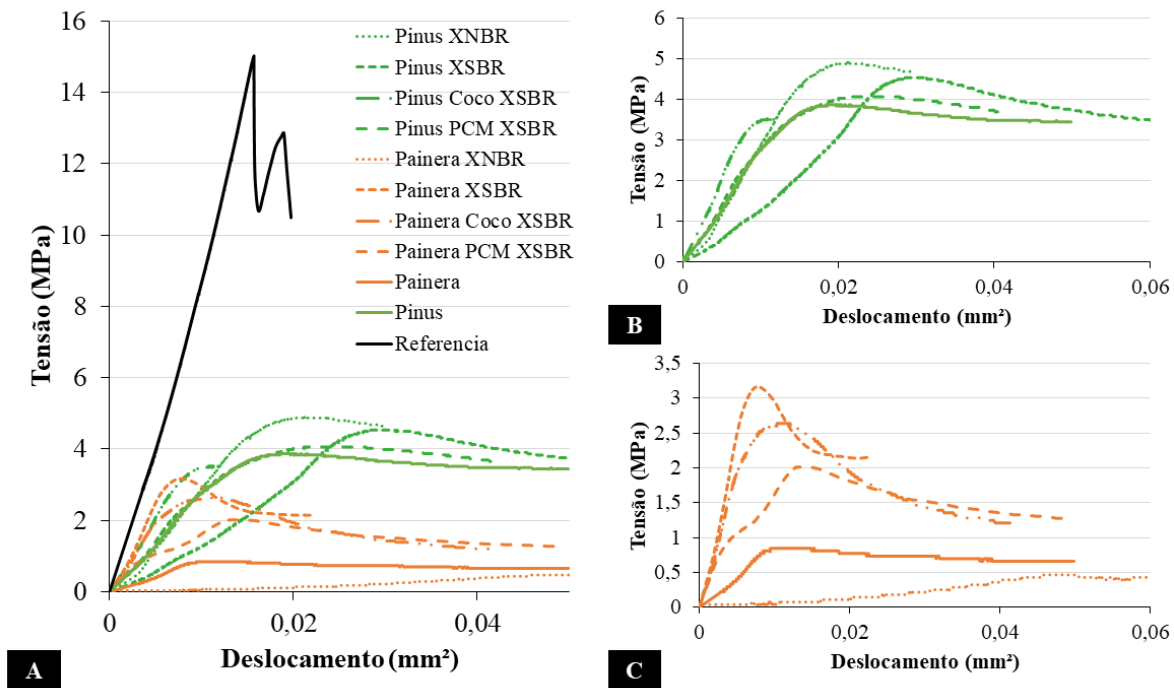
A resistência máxima dos bio agregados compostos por madeira de Pinus variou entre 2,76 e 3,56 MPa. Os valores de desvio padrão registraram-se na faixa de 0,51 a 0,92 MPa, com um coeficiente de variação entre 18% e 26%. Quanto ao módulo de elasticidade desses bioagregados, os resultados situaram-se entre 154 e 268 MPa. Os desvios padrão correspondentes variaram de 48 a 121 MPa, apresentando um coeficiente de variação entre 24% e 70%.

Os compósitos envolvendo bioagregados compostos por madeira de Paineira demonstraram uma faixa de tensão máxima entre 0,63 e 2,28 MPa. Os valores de desvio padrão correspondentes situaram-se entre 0,09 e 0,62 MPa, com um coeficiente de variação variando entre 12,67% e 29,60%. Em relação ao módulo de elasticidade desses compósitos, os resultados

foram encontrados na faixa de 17 a 269 MPa. Os desvios padrão correspondentes variaram de 10 a 160 MPa, exibindo um coeficiente de variação entre 30% e 80%.

Na figura 17 pode ser observado o comportamento dos compósitos por meio das curvas típicas. Na figura 17A pode ser observado como incorporação dos bio agregados diferem-se do agregado gráudo tradicional. A referência apresenta uma rápida e elevada resistência mecânica, quando ocorre seu rompimento a tensão desce abruptamente.

Figura 26: Curvas típicas do ensaio de compressão para os diferentes compósitos.



Fonte: Leonardo Seibert Kuhn (2024).

Na Figura 26B pode ser observado as curvas típicas dos compósitos com bio agregados da madeira de Pinus. Os compósitos apresentaram inclinação parecidas, apenas o compósito Pinus XSBR que apresento inclinação da reta até o pico de ruptura menor. As inclinações das retas até o os picos são refletidos no módulo de elasticidade (MOE) da análise, dessa maneira o MOE para o compósito Pinus XSBR apresentou o menor valor, de 154 MPa.

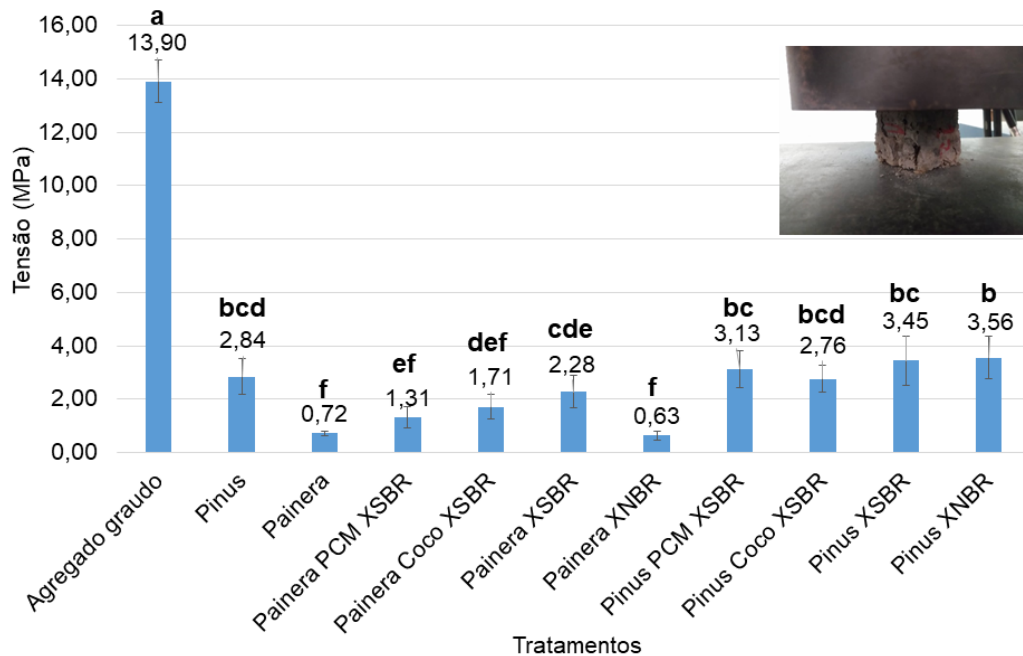
As curvas típicas dos resultados de compressão para os compósitos com bio agregados de madeira de Paineira estão apresentados na Figura 26C. Os compósitos apresentaram maior diferenciação entre si, os compósitos Paineira XSBR seguiu do Paineira Coco XSBR apresentaram o pico de ruptura mais elevado, após a ruptura apresentaram a queda da tensão mais abrupta em

comparação com os outros três compósitos com madeira de Paineira. Contudo, os compósitos Paineira e Paineira XNBR apresentaram baixo MOE e baixa tensão máxima em comparação com os demais compósitos.

De modo geral, os compósitos com bio agregados também apresentaram uma redução gradual da Tensão após o rompimento, diferente da referência. Esse fato pode estar associado as características da madeira e do revestimento, proporcionando maior flexibilidade do compósito.

O resultado da análise estatística para as médias de tensão máxima da análise de compressão estão descritos na Figura 27. O compósito de referência difere-se estatisticamente dos demais.

Figura 27: Resultados da análise estatística pelo teste de tukey das médias da tensão máxima do ensaio de compressão para os diferentes compósitos.



Legenda: Letras diferentes para diferença significativa pelo teste de Tukey.

Fonte: Leonardo Seibert Kuhn (2024).

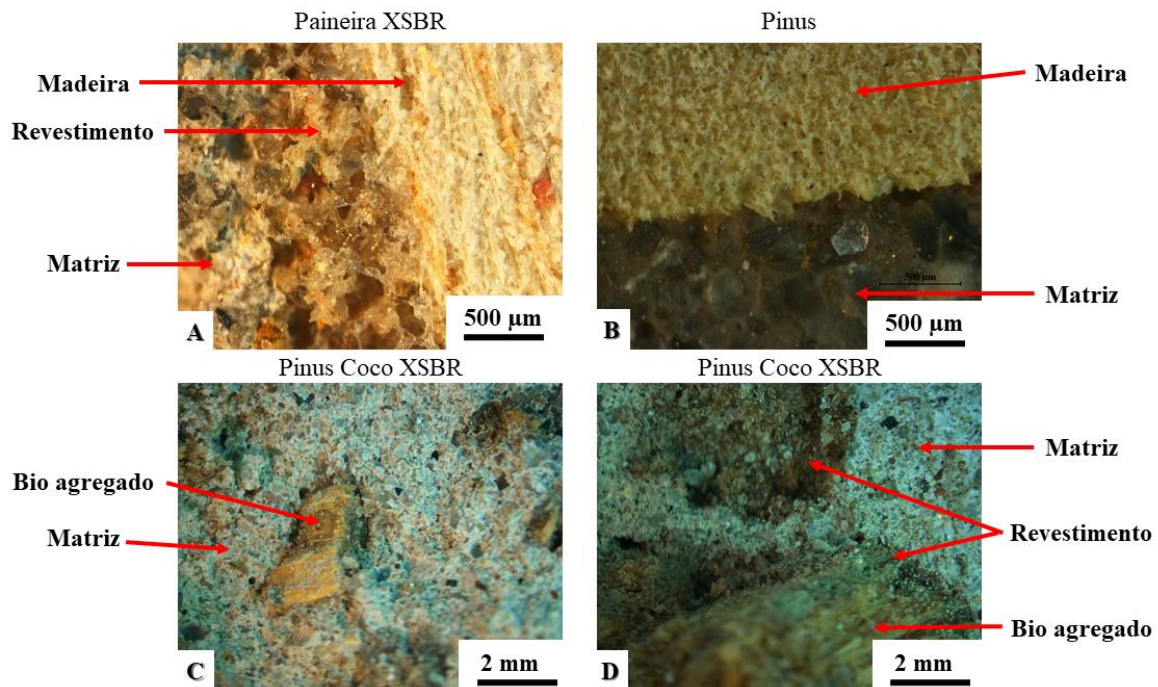
Os compósitos com bio agregados de madeira de Paineira estatisticamente diferem entre si. Os compósitos Paineira e Paineira XSBR apresentaram os menores valores e não diferem dos compósitos Paineira PCM XSBR e Paineira Coco XSBR.

O Compósito Paineira Coco XSBR não difere estatisticamente do compósito Pinus Coco XSBR e o Paineira XSBR não se diferenciou dos compósitos com bio agregados de madeira de Pinus, exceto Pinus XNBR. Os compósitos com bio agregado de madeira de Pinus não tiveram diferença significativa entre si.

A fim de facilitar a avaliação dos compósitos, realizaram-se imagens microscópicas detalhadas das rupturas e das interações entre a matriz e os bio agregados. Estas imagens estão apresentadas na Figura 14 a seguir.

Na Figura 28A, destaca-se a interconexão entre a madeira, o revestimento e a matriz cimentícia. Por outro lado, na Figura 28B, a ausência de revestimento na madeira evidencia uma interface distintiva.

Figura 28: Imagem microscópicas da interação entre matriz e bio agregados.



Fonte: Leonardo Seibert Kuhn (2024).

Nas Figuras 28C e 28D, são evidenciadas as áreas dos bio agregados expostas após a falha do material. Na imagem 28C, é perceptível a madeira exposta sem o revestimento, enquanto na imagem D, o revestimento permanece aderido à matriz cimentícia. Esses resultados apontam para a necessidade de estudos mais aprofundados visando aprimorar as características de adesão entre a madeira, o revestimento e a matriz cimentícia.

Os resultados mecânicos dos bio agregados para as duas madeiras tiveram um comportamento diferente. Os compósitos com madeira de Paineira apresentaram aumento da resistência mecânica com a encapsulação das partículas de madeira, contudo aqueles com PCM ou óleo de coco foi menor que o compósito somente revestido com XSBR. Este efeito não foi observado nos resultados das compósitos com madeira de Pinus.

A madeira proveniente da Paineira exibe uma baixa densidade básica, aproximadamente $0,25 \text{ g/cm}^3$. No entanto, em comparação, pode-se estabelecer uma relação com as propriedades da madeira de Balsa (*Ochroma pyramidale*), famosa mundialmente pela sua densidade também baixa, variando de aproximadamente $0,15$ a $0,25 \text{ g/cm}^3$. A madeira de Balsa apresenta resistência mecânica em torno de 9 a 15 MPa na compressão paralela às fibras (GOODRICH *et al.*, 2010; KOTLAREWSKI *et al.*, 2016).

A madeira proveniente do Pinus possui densidade um pouco maior, de aproximadamente $0,45 \text{ g/cm}^3$ e sua resistência mecânica a compressão está varia de 30 a 60 MPa de acordo com a espécie do Pinus, idade e localização da amostra na árvore (MUSTEFAGA *et al.*, 2019; PERTUZZATTI *et al.*, 2018; SERPA *et al.*, 2003).

O efeito da encapsulação teve diferente respostas para as duas madeiras. Para os bio agregados com madeira de Pinus o revestimento não teve diferença estatisticamente, no entanto com a madeira de Paineira teve diferença. O compósito Paineira XNBR teve o menor resultado dentre os compósitos, já o compósito Paineira XSBR apresentou o maior resultado dentre os compósitos com bio agregado de madeira de Paineira.

A introdução do XSBR como revestimento das fibras para a matriz cimentícia demonstra uma melhoria significativa na interação entre a biomassa e a matriz. Esse polímero estabelece uma ligação química com as hidroxilas presentes na biomassa e com os produtos resultantes da hidratação do cimento, tais como o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e os sulfoaluminatos de cálcio hidratado (entrigita). Adicionalmente, o polímero oferece uma distribuição uniforme de forças através de esforços físicos (FERREIRA, S. R. *et al.*, 2015; ROCHA FERREIRA *et al.*, 2020).

A análise de diferentes estudos revela impactos significativos na resistência à compressão ao introduzir materiais de mudança de fase em compósitos ou agregados. Mankel *et al.*, em 2021 (MANKEL *et al.*, 2021), relataram uma redução entre 20% e 30% na resistência à compressão quando substituíram agregados por materiais reciclados de resíduos de construção e incorporaram PCM na porosidade desses agregados. Em uma pesquisa subsequente, os mesmos pesquisadores observaram uma redução ainda mais significativa, chegando a 50%, ao parcialmente substituir a pasta cimentícia por microcápsulas de PCM (MANKEL; CAGGIANO; KOENDERS, E., 2019).

Outros estudos, como o de Memon *et al.*, em 2015 (MEMON *et al.*, 2015), que exploraram a utilização de agregados de baixa densidade com argila expandida e PCM,

constatarem uma diminuição de até 50% na resistência à compressão. Além disso, Hekimoglu (HEKIMOĞLU *et al.*, 2021), em uma pesquisa envolvendo argamassa com sílica fume e PCM, observou uma redução na resistência à compressão de até 54% ao realizar a substituição parcial do cimento por sílica fume com PCM nas proporções de 10%, 15% e 20%.

Adicionalmente, Mohseni *et al.*, em 2019 (MOHSENI; TANG, W.; WANG, Shanyong, 2019), ao incorporar PCM na escória para produzir um agregado leve, constataram uma redução na resistência à compressão de 30% a 40%.

De acordo com a NBR 8953 os concretos leves apresentam densidade inferior a 2 g/cm³. Quanto a classificação de resistência mecânica é referente aos concretos leves CL e a resistência mecânica, neste caso CL1 ou CL2 (JANEIRO, 2000). Conforme a NBR 6118 a resistência mínima de um concreto é de 20 MPa (6118, 2005) e a NBR 15812 a resistência mínima de uma argamassa é de 1,5 MPa (ABNT, 2010).

Devido a versatilidade dos concretos leves sua aplicação está ligada diretamente com sua densidade e resultados mecânicos. A densidade pode variar de 0,3 a 2 g/cm³ e a resistência a compressão de 1 a 60 MPa. Dessa forma eles podem ser aplicados em diferentes situações como concreto estrutural leve, alvenaria, isolamentos térmicos e acústicos (ELANGO *et al.*, 2020; HAMAD MOHAMMED; JIHAD HAMAD, 2014; THIENEL; HALLER; BEUNTNER, 2020).

Estes estudos coletivos indicam consistentemente uma tendência de redução na resistência à compressão ao se incorporar PCM ou materiais de baixa densidade em compósitos e agregados, o que destaca a importância de uma avaliação cuidadosa dos impactos mecânicos ao se introduzir esses materiais na formulação de novos materiais de construção.

5 CONCLUSÃO

A produção dos bio agregados produzidos com material de mudança de estado apresentaram capacidade de armazenamento de energia térmica. Os bio agregados produzidos com madeira de Pinus apresentaram maior eficiência energética e resistência mecânica que os bio agregados com madeira de Paineira.

Os bio agregados produzidos apresentaram diferentes porcentagem de massa para as duas espécies de madeira. O bio agregado com madeira de Paineira apresentou 9, 24 e 66 % de massa de madeira, PCM ou óleo de coco, e revestimento, respectivamente, e densidade de 0,99 g/cm³ aproximadamente. Com a madeira de Pinus as porcentagens dos materiais foi de 14, 29 e 55 % da massa de madeira, PCM ou óleo de coco, e revestimento e densidade de 1,25 g/cm³.

Quando aplicado os bio agregados na matriz cimentícia, a porcentagem da massa de PCM, para o traço utilizado, apresentou 7% para o bio agregado com madeira de Pinus, enquanto para o compósito com madeira de Paineira apresentou 5% de PCM.

Por meio da análise térmica os resultados do compósito com bio agregado de madeira de Pinus apresentou melhor eficiência energética, ou maior manutenção da temperatura. Isso pode ser observado quando a área do gráfico proporcionada pela análise representou quase o dobro em comparação com o resultado da análise do bio agregado com madeira de Paineira. O resultado das áreas foram de aproximadamente 200 °C.min para 400 °C.min. O óleo de coco também apresentou eficiência energética, entretanto em menor proporção que o PCM. As áreas dos gráficos variaram de 55 a 158 °C.min.

De acordo com os resultados de infravermelho, os materiais não apresentaram interação química. Contudo ainda é necessária uma avaliação de durabilidade.

O efeito dos materiais para produção do bio agregado podem ter influenciado nos resultados térmicos e mecânicos. Os diferentes materiais possuem condutividade térmicas diferentes, contudo não expressivo nos resultados térmicos. Nos resultados mecânicos, os bio agregados com madeira de Pinus não apresentaram diferença estatística. Contudo, para os bio agregados de madeira de Paineira teve diferença significativa, onde que a encapsulação apresentou maior resistência mecânica.

Os bio agregados apresentaram redução da resistência mecânica em comparação com os agregados graúdos tradicionalmente utilizados. No entanto podem ser utilizados para elementos não estruturais como paredes e revestimentos.

Ainda são necessários mais estudos, podendo melhorar as propriedades dos bio agregados como sua aplicação em escala real. Também se buscando custos de aplicação, redução do consumo energético para controle de temperatura do ambiente, e durabilidade dos bio agregados.

6 REFERÊNCIAS

- 196-1, D. E. **Strength, Methods of testing cement - Part 1: Determination of.** [S.l.]: [s.n.], 2016.
- 6118, A. N. Abnt Nbr. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 2005. p. 8.
- ABBASI HATTAN, H.; MADHKHAN, M.; MARANI, A. Thermal and mechanical properties of building external walls plastered with cement mortar incorporating shape-stabilized phase change materials (SSPCMs). **Construction and Building Materials**, 2021. v. 270, n. xxxx, p. 121385. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121385>>.
- ABID, H. *et al.* Phase transition in organic-inorganic perovskite (C₉H₁₉NH₃)₂PbI₂Br₂ of long-chain alkylammonium. **Results in Physics**, 2012. v. 2, p. 71–76. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rinp.2012.04.003>>.
- ABNT. **NBR 15812 -1- Alvenaria estrutural blocos cerâmicos - projetos.**
- AFZAL, A.; KAUSAR, A.; SIDDIQ, M. Role of polymeric composite in civil engineering applications: a review. **Polymer-Plastics Technology and Materials**, 2020. v. 59, n. 10, p. 1023–1040. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/25740881.2020.1719141>>.
- AKEIBER, H. J. *et al.* Thermal performance and economic evaluation of a newly developed phase change material for effective building encapsulation. **Energy Conversion and Management**, 2017. v. 150, n. July, p. 48–61. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2017.07.043>>.
- ALAM, T. E. *et al.* Macroencapsulation and characterization of phase change materials for latent heat thermal energy storage systems. **Applied Energy**, 2015. v. 154, p. 92–101. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.086>>.
- ALQAHTANI, T. *et al.* Experimental and numerical assessment of using coconut oil as a phase-change material for unconditioned buildings. **International Journal of Energy Research**, 2020. v. 44, n. 7, p. 5177–5196.
- ARJENAKI, N. O.; SOLTANIZADEH, N.; HAMDAMI, N. Designing an active phase change material package for thermal and qualitative protection of meat. **Food Packaging and Shelf Life**, 2019. v. 21, n. May.
- ASADI, I. *et al.* Thermal conductivity of concrete – A review. **Journal of Building Engineering**, 2018. v. 20, n. April, p. 81–93.
- ATWOOD, G. ENGINEERING: Phase-Change Materials for Electronic Memories. **Science**, 11 jul. 2008. v. 321, n. 5886, p. 210–211. Disponível em: <<https://www.sciencemag.org/lookup/doi/10.1126/science.1160231>>.
- BALDIN, T. *et al.* Anatomia da madeira e potencial de produção de celulose e papel de quatro

espécies jovens de Eucalyptus L'Hér. **Revista Ciência da Madeira - RCM**, 2017. v. 8, n. 2, p. 114–126.

BARRENECHE, C. *et al.* PCM/wood composite to store thermal energy in passive building envelopes. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, 2017. v. 251, n. 1.

BAYÉS-GARCÍA, L. *et al.* Phase Change Materials (PCM) microcapsules with different shell compositions: Preparation, characterization and thermal stability. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, 2010. v. 94, n. 7, p. 1235–1240.

BERARDI, U.; GALLARDO, A. A. Properties of concretes enhanced with phase change materials for building applications. **Energy and Buildings**, 2019. v. 199, p. 402–414. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.07.014>>.

BOER, D. *et al.* Approach for the analysis of TES technologies aiming towards a circular economy: Case study of building-like cubicles. **Renewable Energy**, 2020. v. 150, p. 589–597.

BONACCORSO, F. *et al.* Graphene, related two-dimensional crystals, and hybrid systems for energy conversion and storage. **Science**, 2015. v. 347, n. 6217.

BORREGUERO, A. M. *et al.* Synthesis and characterization of microcapsules containing Rubitherm®RT27 obtained by spray drying. **Chemical Engineering Journal**, 2011. v. 166, n. 1, p. 384–390.

BOUGUERRA, A. *et al.* Isothermal moisture properties of wood-cementitious composites. **Cement and Concrete Research**, 1999. v. 29, n. 3, p. 339–347.

BROWNE, M. C.; NORTON, B.; MCCORMACK, S. J. Phase change materials for photovoltaic thermal management. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2015. v. 47, p. 762–782. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.050>>.

CABEZA, L. F. *et al.* Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2011. v. 15, n. 3, p. 1675–1695. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.018>>.

CARVALHO, P. E. R. Paineira *Chorisia speciosa*. **Espécies Arboréas Brasileiras**, [s.d.]. v. 1. Disponível em: <<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1140100/1/Especies-Arboreas-Brasileiras-vol-1-Paineira.pdf>>.

CAVALCANTE, R. *et al.* Aproveitamento de resíduos da madeira de candeia... APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DA MADEIRA DE CANDEIA (*Eremanthus erythropappus*) PARA PRODUÇÃO DE PAINÉIS CIMENTO-MADEIRA USE OF CANDEIA S (*Eremanthus erythropappus*) WASTE WOOD FOR WOOD-CEMENT PANELS PRODUCTI. 2008. n. 3, p. 241–250.

CHESHOMI, A.; MOUSAVI, E.; AHMADI-SHESHDE, E. Evaluation of single particle loading test to estimate the uniaxial compressive strength of sandstone. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, 2015. v. 135, p. 421–428. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.1016/j.petrol.2015.09.031>>.

_____; SHESHDE, E. A. Determination of uniaxial compressive strength of microcrystalline limestone using single particles load test. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, 2013. v. 111, p. 121–126. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.petrol.2013.10.015>>.

DENG, Y. *et al.* Thermal conductivity enhancement of polyethylene glycol/expanded vermiculite shape-stabilized composite phase change materials with silver nanowire for thermal energy storage. **Chemical Engineering Journal**, 2016. v. 295, p. 427–435. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2016.03.068>>.

DING, W. D. *et al.* Relationship between wood porosity, wood density and methyl methacrylate impregnation rate. **Wood Material Science and Engineering**, 2008. v. 3, n. 1–2, p. 62–70.

DIXIT, P. *et al.* Thermal Buffering Performance of a Propyl Palmitate/Expanded Perlite-Based Form-Stable Composite: Experiment and Numerical Modeling in a Building Model. **Energy and Fuels**, 2021. v. 35, n. 3, p. 2704–2716.

DUTKOWSKI, K.; FIUK, J. J. Experimental research of viscosity of microencapsulated PCM slurry at the phase change temperature. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 2019. v. 134, p. 1209–1217. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.02.036>>.

ELANGO, K. S. *et al.* Properties of light weight concrete - A state of the art review. **Materials Today: Proceedings**, 2020. v. 46, p. 4059–4062. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.571>>.

FABIANI, C. *et al.* Palm oil-based bio-PCM for energy efficient building applications: Multipurpose thermal investigation and life cycle assessment. **Journal of Energy Storage**, 2020. v. 28, n. June 2019, p. 101129. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101129>>.

FANG, G. *et al.* Preparation and characterization of nano-encapsulated n-tetradecane as phase change material for thermal energy storage. **Chemical Engineering Journal**, 2009. v. 153, n. 1–3, p. 217–221.

FAYAZ, G.; GOLI, S. A. H.; KADIVAR, M. A Novel Propolis Wax-Based Organogel: Effect of Oil Type on Its Formation, Crystal Structure and Thermal Properties. **JAOCs, Journal of the American Oil Chemists' Society**, 2017. v. 94, n. 1, p. 47–55.

FERREIRA, S. R. *et al.* Effect of fiber treatments on the sisal fiber properties and fiber-matrix bond in cement based systems. **Construction and Building Materials**, 2015. v. 101, p. 730–740. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.120>>.

FIDELIS, M. E. A.; ANDRADE SILVA, F. DE; FILHO, R. D. T. The influence of fiber treatment on the mechanical behavior of jute textile reinforced concrete. **Key Engineering Materials**, 2014. v. 600, p. 469–474.

FU, W. *et al.* Thermophysical properties of n-tetradecane@polystyrene-silica composite

nanoencapsulated phase change material slurry for cold energy storage. **Energy and Buildings**, 2017. v. 136, p. 26–32. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.001>>.

GE, H. *et al.* Low melting point liquid metal as a new class of phase change material: An emerging frontier in energy area. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2013. v. 21, p. 331–346. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.008>>.

GIL, J. L. R. A. Dendrocronologia em árvores de espécies de restauração florestal Júlia. 2022. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-12082022-102516/publico/Julia_Lobo_Ribeiro_Anciotti_Gil_versao_revisada.pdf>.

GIRO-PALOMA, J. *et al.* Physico-chemical and mechanical properties of microencapsulated phase change material. **Applied Energy**, 2013. v. 109, p. 441–448. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.007>>.

GOODRICH, T. *et al.* High-temperature mechanical properties and thermal recovery of balsa wood. **Journal of Wood Science**, 2010. v. 56, n. 6, p. 437–443.

GUIMARÃES, B. M. R. *et al.* Bio-based films/nanopapers from lignocellulosic wastes for production of added-value micro-/nanomaterials. **Environmental Science and Pollution Research**, 2022. v. 29, n. 6, p. 8665–8683.

HAMAD MOHAMMED, J.; JIHAD HAMAD, A. Materials, properties and application review of Lightweight concrete. **Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia**, 2014. v. 37, n. 1, p. 10–15. Disponível em: <<http://www.lafarge.com/>>.

HASAN, K. M. F.; HORVÁTH, P. G.; ALPÁR, T. Development of lignocellulosic fiber reinforced cement composite panels using semi-dry technology. **Cellulose**, 2021. v. 28, n. 6, p. 3631–3645.

HEKIMOĞLU, G. *et al.* Silica fume/capric acid-stearic acid PCM included-cementitious composite for thermal controlling of buildings: Thermal energy storage and mechanical properties. **Energy**, 2021. v. 219.

HOANG, H. M. *et al.* Heat transfer modelling of encapsulated phase change materials for food packaging. **Refrigeration Science and Technology**, 2014. p. 405–411.

HOANG, H. M. *et al.* Heat transfer study of submicro-encapsulated PCM plate for food packaging application. **International Journal of Refrigeration**, 2015. v. 52, p. 151–160.

HÖHLEIN, S.; KÖNIG-HAAGEN, A.; BRÜGGEMANN, D. Macro-encapsulation of inorganic phase-change materials (PCM) in metal capsules. **Materials**, 2018. v. 11, n. 9.

HONG, S. T.; HERLING, D. R. Effects of surface area density of aluminum foams on thermal conductivity of aluminum foam-phase change material composites. **Advanced Engineering Materials**, 2007. v. 9, n. 7, p. 554–557.

HUANG, Xiang *et al.* Morphological characterization and applications of phase change materials

in thermal energy storage: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2017. v. 72, n. April 2016, p. 128–145. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.048>>.

_____ *et al.* Thermal properties and applications of microencapsulated PCM for thermal energy storage: A review. **Applied Thermal Engineering**, 2019. v. 147, n. August 2018, p. 841–855. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.11.007>>.

HUANG, Xiubing *et al.* Shape-stabilized phase change materials based on porous supports for thermal energy storage applications. **Chemical Engineering Journal**, 2019. v. 356, n. August 2018, p. 641–661. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ccej.2018.09.013>>.

IBÁ. Relatório anua 2022. 2022. p. 96.

INÉS FERNÁNDEZ, A. *et al.* Unconventional experimental technologies used for phase change materials (PCM) characterization: Part 2 - Morphological and structural characterization, physico-chemical stability and mechanical properties. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2015. v. 43, p. 1415–1426.

IQBAL, K.; SUN, D. Development of thermo-regulating polypropylene fibre containing microencapsulated phase change materials. **Renewable Energy**, 2014. v. 71, p. 473–479. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2014.05.063>>.

JANEIRO, R. De. NBR 8953 Concreto para fins estruturais - Classificação por grupos de resistência. 2000. p. 2–3.

JIANG, J. *et al.* Preparation and performances of bulk porous Al foams impregnated with phase-change-materials for thermal storage. **Progress in Natural Science: Materials International**, 2012. v. 22, n. 5, p. 440–444. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.pnsc.2012.05.004>>.

JIANG, S. *et al.* Factors influencing the performance of cement emulsified asphalt mortar – A review. **Construction and Building Materials**, 2021. v. 279, p. 122479. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122479>>.

JOHNSTON, J. H. *et al.* Composite nano-structured calcium silicate phase change materials for thermal buffering in food packaging. **Current Applied Physics**, 2008. v. 8, n. 3–4, p. 508–511.

KARADAE, S. R.; IRLE, M. A.; MAHER, K. Physico-Chemical Aspects of use of Cork in Cementitious Composites. 2011. n. March 2014.

KARAIPEKLI, A. *et al.* Thermal characteristics of expanded perlite/paraffin composite phase change material with enhanced thermal conductivity using carbon nanotubes. **Energy Conversion and Management**, 2017. v. 134, p. 373–381. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2016.12.053>>.

KAYGUSUZ, K.; SALEH, T. A. Carbonized waste hazelnut wood-based shape-stable composite phase change materials for thermal management implementations. 2021. n. December 2020, p. 10271–10284.

KHAN, Zakir; KHAN, Zulfiqar; GHAFOR, A. A review of performance enhancement of PCM based latent heat storage system within the context of materials, thermal stability and compatibility. **Energy Conversion and Management**, maio. 2016. v. 115, p. 132–158.

KIAEI, M. *et al.* Radial variation of fiber dimensions, annual ring width, and wood density from natural and plantation trees of alder (*Alnus Glutinosa*) Wood. **Wood Research**, 2016. v. 61, n. 1, p. 55–64.

KOENDERS, E.A.B.; MANKEL, C.; CAGGIANO, A. **Dynamische Kugel Kalorimetrie (DKK)**.

KOTLAREWSKI, N. J. *et al.* Mechanical properties of Papua New Guinea balsa wood. **European Journal of Wood and Wood Products**, 2016. v. 74, n. 1, p. 83–89.

LECOMPTE, T. *et al.* Mechanical and thermo-physical behaviour of concretes and mortars containing phase change material. **Energy and Buildings**, 2015. v. 94, p. 52–60. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.02.044>>.

LEDUCQ, D.; NDOYE, F. T.; ALVAREZ, G. ScienceDirect Phase change material for the thermal protection of ice cream during storage and transportation riau a changement de phase pour la protection Mat e me glac e e pendant l ’ entreposage et le thermique de cr e transport. **International Journal of Refrigeration**, 2014. v. 52, p. 133–139. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2014.08.012>>.

LI, B. *et al.* Stearic-acid/carbon-nanotube composites with tailored shape-stabilized phase transitions and light-heat conversion for thermal energy storage. **Energy Conversion and Management**, 2015. v. 98, p. 314–321. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2015.04.002>>.

LI, G. *et al.* From anisotropic graphene aerogels to electron- and photo-driven phase change composites. **Journal of Materials Chemistry A**, 2016. v. 4, n. 43, p. 17042–17049. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1039/C6TA07587H>>.

LI, Yang *et al.* Performance enhancement of rubberised concrete via surface modification of rubber: A review. **Construction and Building Materials**, 2019. v. 227, p. 116691. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116691>>.

LIN, X. *et al.* MgO. 1994. v. 24, n. 8, p. 1558–1566.

LING, Z. *et al.* Review on thermal management systems using phase change materials for electronic components, Li-ion batteries and photovoltaic modules. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2014. v. 31, p. 427–438. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.017>>.

LIU, C. *et al.* Experimental research on flow and heat transfer characteristics of latent functional thermal fluid with microencapsulated phase change materials. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 2017. v. 115, p. 737–742. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.07.107>>.

MA, H. *et al.* Strategies for enhancing thermal conductivity of polymer-based thermal interface materials: a review. **Journal of Materials Science**, 2021. v. 56, n. 2, p. 1064–1086. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10853-020-05279-x>>.

MAHDAOUI, M. *et al.* Building bricks with phase change material (PCM): Thermal performances. **Construction and Building Materials**, 2021. v. 269, p. 121315. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121315>>.

MAHFUZ, M. H. *et al.* Performance investigation of thermal energy storage system with Phase Change Material (PCM) for solar water heating application. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, 2014. v. 57, p. 132–139. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.07.022>>.

MAHZUZ, H. M. A; AHMED, M. Production of Light Weight Concrete by Bio- Materials. **International Journal of Civil and Environmental Engineering**, 2012. v. 12, n. 05, p. 1–8.

MANKEL, C. *et al.* Thermal energy storage characterization of cement-based systems containing microencapsulated-PCMs. **Construction and Building Materials**, 2019. v. 199, p. 307–320. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.195>>.

_____ *et al.* Green Cementitious Composites Made with PCM-Recycled Brick Aggregates: Thermal Energy Storage Characterization and Modelling. [S.l.]: [s.n.], 2021, p. 179–190.

_____; CAGGIANO, A.; KOENDERS, E. Thermal energy storage characterization of cementitious composites made with recycled brick aggregates containing PCM. **Energy and Buildings**, 2019. v. 202, p. 109395. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109395>>.

MANTILLA GILART, P. *et al.* Development of PCM/carbon-based composite materials. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, 2012. v. 107, p. 205–211.

MARINA, A. M. *et al.* Chemical properties of virgin coconut oil. **JAOCs, Journal of the American Oil Chemists' Society**, 2009. v. 86, n. 4, p. 301–307.

MASON, P. E. *et al.* Comparative Study of the Thermal Conductivity of Solid Biomass Fuels. **Energy and Fuels**, 2016. v. 30, n. 3, p. 2158–2163.

MELONE, L. *et al.* Phase change material cellulosic composites for the cold storage of perishable products: From material preparation to computational evaluation. **Applied Energy**, 2012. v. 89, n. 1, p. 339–346. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.07.039>>.

MEMON, S. A. *et al.* Development of structural-functional integrated concrete with macro-encapsulated PCM for thermal energy storage. **Applied Energy**, 2015. v. 150, p. 245–257. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.137>>.

MILIÁN, Y. E. *et al.* A review on encapsulation techniques for inorganic phase change materials and the influence on their thermophysical properties. **Renewable and Sustainable Energy**

Reviews, 2017. v. 73, n. December 2016, p. 983–999. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.159>>.

MOHSENI, E.; TANG, W.; WANG, Shanyong. Development of thermal energy storage lightweight structural cementitious composites by means of macro-encapsulated PCM. **Construction and Building Materials**, 2019. v. 225, p. 182–195. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.136>>.

MU, M. *et al.* Shape stabilised phase change materials based on a high melt viscosity HDPE and paraffin waxes. **Applied Energy**, 2016. v. 162, p. 68–82. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.030>>.

MUSTEFAGA, E. C. *et al.* Physico-mechanical characterization of pine juvenile wood. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, 2019. v. 47, n. 123, p. 472–481.

NAZIR, H. *et al.* Recent developments in phase change materials for energy storage applications: A review. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 2019. v. 129, p. 491–523. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.09.126>>.

NEMATPOUR KESHTELI, A.; SHEIKHOLESLAMI, M. Nanoparticle enhanced PCM applications for intensification of thermal performance in building: A review. **Journal of Molecular Liquids**, 2019. v. 274, p. 516–533. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.10.151>>.

PARAMESHWARAN, R. *et al.* Preparation, thermal and rheological properties of hybrid nanocomposite phase change material for thermal energy storage. **Applied Energy**, 2014. v. 115, p. 320–330. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.11.029>>.

PEPE, M. *et al.* Mechanical behaviour of coarse, lightweight, recycled and natural aggregates for concrete. **Proceedings of Institution of Civil Engineers: Construction Materials**, 2020. v. 173, n. 2, p. 70–78.

PERTUZZATTI, A. *et al.* Wood densification. **BioResources**, 2018. v. 13, n. 1, p. 1576–1590.

PRADHAN, N. R. *et al.* The specific heat and effective thermal conductivity of composites containing single-wall and multi-wall carbon nanotubes. **Nanotechnology**, 2009. v. 20, n. 24.

PU, L. *et al.* Optimization of ground heat exchanger using microencapsulated phase change material slurry based on tree-shaped structure. **Applied Energy**, 2019. v. 240, n. December 2018, p. 860–869. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.02.088>>.

QIU, X. *et al.* Preparation, thermal properties and thermal reliabilities of microencapsulated n-octadecane with acrylic-based polymer shells for thermal energy storage. **Thermochimica Acta**, 2013. v. 551, p. 136–144. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tca.2012.10.027>>.

RAJ, C. R. *et al.* Life cycle assessment of nanoalloy enhanced layered perovskite solid-solid phase change material till 10000 thermal cycles for energy storage applications. **Journal of Energy Storage**, 2021. v. 35, n. October 2020, p. 102220. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1016/j.est.2020.102220>>.

RAMAKRISHNAN, S. *et al.* A novel paraffin/expanded perlite composite phase change material for prevention of PCM leakage in cementitious composites. **Applied Energy**, 2015. v. 157, p. 85–94. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.08.019>>.

RATHOD, M. K.; BANERJEE, J. Thermal stability of phase change materials used in latent heat energy storage systems: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2013. v. 18, p. 246–258. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.022>>.

REAL, S. *et al.* Thermal conductivity modelling of structural lightweight aggregate concrete. **Magazine of Concrete Research**, 2021. v. 73, n. 15, p. 798–809.

REN, M. *et al.* Thermal and mechanical properties of ultra-high performance concrete incorporated with microencapsulated phase change material. **Construction and Building Materials**, 2021. v. 273, p. 121714. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121714>>.

ROCHA FERREIRA, S. *et al.* The influence of carboxylated styrene butadiene rubber coating on the mechanical performance of vegetable fibers and on their interface with a cement matrix. **Construction and Building Materials**, 2020. v. 262, p. 120770. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120770>>.

ROMEIRO, D. A arquitetura hidráulica e a densidade da madeira na separação de espécies arbóreas em grupos funcionais. 2013. p. 1–50. Disponível em: <http://arquivos.ambiente.sp.gov.br/pgibt/2014/07/Diego_Romeiro_MS.pdf>.

ROUAULT, F. *et al.* Numerical modelling of tube bundle thermal energy storage for free-cooling of buildings. **Applied Energy**, 2013. v. 111, p. 1099–1106. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.05.055>>.

Roundwood, coniferous + (Total) Production Quantity in World + (Total). [s.d.]. Disponível em: <<https://www.fao.org/faostat/en/#data/FO/visualize>>.

RUDRA MURTHY, B. V.; GUMTAPURE, V. Thermo-physical analysis of natural shellac wax as novel bio-phase change material for thermal energy storage applications. **Journal of Energy Storage**, 2020. v. 29, n. March, p. 101390. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101390>>.

SAID, M. S. M.; TOHIR, M. Z. M. The effect of ultraviolet coating on containment and fire hazards of phase change materials impregnated wood structure. **Journal of Energy Storage**, 2020. v. 32, n. July, p. 101727. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101727>>.

SAM, M. N. *et al.* A comparative study on the thermal energy storage performance of bio-based and paraffin-based PCMs using DSC procedures. **Materials**, 2020. v. 13, n. 7.

SAMI, S.; SADRAMELI, S. M.; ETESAMI, N. Thermal properties optimization of microencapsulated a renewable and non-toxic phase change material with a polystyrene shell for

thermal energy storage systems. **Applied Thermal Engineering**, 2018. v. 130, p. 1416–1424. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.11.119>>.

SÁNCHEZ, L. *et al.* Influence of operation conditions on the microencapsulation of PCMs by means of suspension-like polymerization. **Colloid and Polymer Science**, 2008. v. 286, n. 8–9, p. 1019–1027.

SANTOS, D. O. J. *et al.* Compressive stress strain behavior of workable bio-concretes produced using bamboo, rice husk and wood shavings particles. **2nd International Conference on Bio-Based Building Materials, RILEM**, 2017. n. June, p. 211–217.

SARGAM, Y.; WANG, K.; ALLEMAN, J. E. Effects of Modern Concrete Materials on Thermal Conductivity. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 2020. v. 32, n. 4, p. 1–11.

SARI, A. *et al.* Microencapsulated n-octacosane as phase change material for thermal energy storage. **Solar Energy**, 2009. v. 83, n. 10, p. 1757–1763. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2009.05.008>>.

_____ *et al.* Micro/nano-encapsulated n-heptadecane with polystyrene shell for latent heat thermal energy storage. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, 2014. v. 126, p. 42–50.

ŠAVIJA, B.; ZHANG, Hongzhi; SCHLANGEN, E. Influence of microencapsulated phase change material (PCM) addition on (micro) mechanical properties of cement paste. **Materials**, 2017. v. 10, n. 8.

SAXENA, R.; RAKSHIT, D.; KAUSHIK, S. C. Phase change material (PCM) incorporated bricks for energy conservation in composite climate: A sustainable building solution. **Solar Energy**, 2019. v. 183, n. January, p. 276–284. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.03.035>>.

SERPA, P. N. *et al.* Avaliação de algumas propriedades da madeira de Eucalyptus grandis, Eucalyptus saligna e Pinus elliottii. **Revista Árvore**, 2003. v. 27, n. 5, p. 723–733.

SEYF, H. R.; HENRY, A. Thermophotovoltaics: A potential pathway to high efficiency concentrated solar power. **Energy and Environmental Science**, 2016. v. 9, n. 8, p. 2654–2665.

SHARIFI, N. P.; SAKULICH, A. Application of phase change materials to improve the thermal performance of cementitious material. **Energy and Buildings**, 2015. v. 103, p. 83–95. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.040>>.

SHARMA, A. *et al.* Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2009. v. 13, n. 2, p. 318–345.

SHI, C. *et al.* Effects of SAE and SBR on properties of rapid hardening repair mortar. **Journal of Building Engineering**, 2021. v. 35, n. August 2020, p. 102000. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.job.2020.102000>>.

SHI, X. *et al.* **Experimental assessment of position of macro encapsulated phase change**

material in concrete walls on indoor temperatures and humidity levels. [S.l.]: Elsevier B.V., 2014. V. 71.

SILVA, N. V. *et al.* Improved method to measure the strength and elastic modulus of single aggregate particles. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, 2019. v. 52, n. 4.

SILVEIRA, M. *et al.* Use of alternative aggregate for lightweight concrete production. **Academic Journal of Civil Engineering**, 2019. v. 37, n. 2, p. 576–582.

SINGH RATHORE, P. K.; SHUKLA, S. K.; GUPTA, N. K. Potential of microencapsulated PCM for energy savings in buildings: A critical review. **Sustainable Cities and Society**, 2020. v. 53, p. 101884. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101884>>.

SINGH, S. *et al.* Temperature-regulating materials for advanced food packaging applications: a review. **Journal of Food Measurement and Characterization**, 2018. v. 12, n. 1, p. 588–601. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11694-017-9672-5>>.

_____; GAIKWAD, K. K.; LEE, Y. S. Phase change materials for advanced cooling packaging. **Environmental Chemistry Letters**, 2018. v. 16, n. 3, p. 845–859. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10311-018-0726-7>>.

SOCACIU, L. G. Thermal energy storage with phase change material. **Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies**, 2012. v. 11, n. 20, p. 75–98.

SOLÉ, A. *et al.* Stability of sugar alcohols as PCM for thermal energy storage. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, 2014. v. 126, p. 125–134. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2014.03.020>>.

STRITIH, U.; BUTALA, V. Experimental investigation of energy saving in buildings with PCM cold storage. **International Journal of Refrigeration**, 2010. v. 33, n. 8, p. 1676–1683. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2010.07.017>>.

SUDIN, R.; SWAMY, N. Bamboo and wood fibre cement composites for sustainable infrastructure regeneration. **Journal of Materials Science**, 2006. v. 41, n. 21, p. 6917–6924.

TANG, Y. *et al.* Improved thermal properties of stearyl alcohol/high density polyethylene/expanded graphite composite phase change materials for building thermal energy storage. **Energy and Buildings**, 2017. v. 153, p. 41–49. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.005>>.

TAVARES, Luís Marcelo. Chapter 1 Breakage of Single Particles: Quasi-Static. **Handbook of Powder Technology**, 2007. v. 12, n. 21, p. 3–68.

THAIB, R.; HAMDANI, H.; AMIN, M. Utilization of Beeswax/Bentonite as energy storage material on building wall composite. **Journal of Physics: Conference Series**, 2019. v. 1402, n. 4.

THIENEL, K. C.; HALLER, T.; BEUNTNER, N. Lightweight concrete—from basics to

innovations. **Materials**, 2020. v. 13, n. 5.

ÜNAL, M.; KONUKLU, Y.; PAKSOY, H. Thermal buffering effect of a packaging design with microencapsulated phase change material. **International Journal of Energy Research**, 2019. v. 43, n. 9, p. 4495–4505.

USHAK, S. *et al.* Thermophysical characterization of a by-product from the non-metallic industry as inorganic PCM. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, 2015. v. 132, p. 385–391. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2014.08.042>>.

USMAN, M. *et al.* Eco-friendly self-compacting cement pastes incorporating wood waste as cement replacement: A feasibility study. **Journal of Cleaner Production**, 2018. v. 190, p. 679–688. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.186>>.

VALLE, M. L. A. *et al.* Retenção e penetração de CCA em madeira de primeira e segunda rotação de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake. **Ciencia Florestal**, 2013. v. 23, n. 2, p. 483–492.

VASCO, D. A. *et al.* Kinematic characterization of the pressure-dependent PCM impregnation process for radiata pine wood samples. **European Journal of Wood and Wood Products**, 2018. v. 76, n. 5, p. 1461–1469. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s00107-018-1335-7>>.

WANG, Xu *et al.* Experimental assessment on the use of phase change materials (PCMs)-bricks in the exterior wall of a full-scale room. **Energy Conversion and Management**, 2016. v. 120, p. 81–89.

WANG, Y. *et al.* Fabrication and performances of microencapsulated paraffin composites with polymethylmethacrylate shell based on ultraviolet irradiation-initiated. **Materials Chemistry and Physics**, 2012. v. 135, n. 1, p. 181–187. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.matchemphys.2012.04.050>>.

WONORAHARDJO, S. *et al.* Potential of thermal energy storage using coconut oil for air temperature control. **Buildings**, 2018. v. 8, n. 8.

WU, Y.; WANG, T. Hydrated salts/expanded graphite composite with high thermal conductivity as a shape-stabilized phase change material for thermal energy storage. **Energy Conversion and Management**, 2015. v. 101, p. 164–171. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2015.05.006>>.

XIAO, X.; ZHANG, P.; LI, M. Preparation and thermal characterization of paraffin/metal foam composite phase change material. **Applied Energy**, 2013. v. 112, p. 1357–1366.

_____; _____. Effective thermal conductivity of open-cell metal foams impregnated with pure paraffin for latent heat storage. **International Journal of Thermal Sciences**, 2014. v. 81, n. 1, p. 94–105.

XU, B.; LI, P.; CHAN, C. Application of phase change materials for thermal energy storage in concentrated solar thermal power plants: A review to recent developments. **Applied Energy**, 2015. v. 160, p. 286–307. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.09.016>>.

XU, Y. *et al.* Evaluation and optimization of melting performance for a latent heat thermal energy storage unit partially filled with porous media. **Applied Energy**, 2017. v. 193, p. 84–95. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.02.019>>.

YU, S.; WANG, Xiaodong; WU, D. Microencapsulation of n-octadecane phase change material with calcium carbonate shell for enhancement of thermal conductivity and serving durability: Synthesis, microstructure, and performance evaluation. **Applied Energy**, 2014. v. 114, p. 632–643. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.029>>.

ZALBA, B. *et al.* Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. **Applied Thermal Engineering**, 10 fev. 2003. v. 23, n. 3, p. 251–283. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/product/identifier/S0022112012002194/type/journal_article>.

ZHAN, H. *et al.* Phase change material (PCM) integrations into buildings in hot climates with simulation access for energy performance and thermal comfort: A review. **Construction and Building Materials**, 2023. v. 397, n. November 2022.

ZHANG, Huanzhi; WANG, Xiaodong; WU, D. Silica encapsulation of n-octadecane via sol-gel process: A novel microencapsulated phase-change material with enhanced thermal conductivity and performance. **Journal of Colloid and Interface Science**, 2010. v. 343, n. 1, p. 246–255. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis.2009.11.036>>.

ZHANG, Y.; CHOI, J. R.; PARK, S. Enhancing the heat and load transfer efficiency by optimizing the interface of hexagonal boron nitride / elastomer nanocomposites for thermal management applications. **Polymer**, 2018. v. 143, p. 1–9. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.polymer.2018.03.067>>.

ZHOU, D.; ZHAO, C. Y.; TIAN, Y. Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. **Applied Energy**, 2012. v. 92, p. 593–605. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.08.025>>.

ZHU, F.; ZHANG, C.; GONG, X. Numerical analysis and comparison of the thermal performance enhancement methods for metal foam/phase change material composite. **Applied Thermal Engineering**, 2016. v. 109, p. 373–383. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.088>>.