

ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO DE REVESTIMENTOS SUSTENTÁVEIS À BASE DE ARGAMASSA, PET E EPS/ISOPOR

PADILHA, Gustavo Conrado¹
VASCONCELOS, Jessica Hipólito²

RESUMO: A eficiência térmica é um conceito central, especialmente em sistemas construtivos e dispositivos que demandam controle de temperatura, redução de perdas energéticas e promoção do conforto térmico. A gestão adequada da transferência de calor contribui para a sustentabilidade e para o desempenho energético de edificações e equipamentos. Nesse contexto, materiais recicláveis têm se mostrado promissores como aditivos em argamassas, oferecendo potencial para combinar desempenho térmico, conforto e responsabilidade ambiental. Este trabalho investiga a influência de PET e isopor (EPS) na capacidade isolante de argamassas, avaliando protótipos construídos com diferentes composições de revestimento. Foram confeccionadas duas caixas de dimensões idênticas: uma com argamassa convencional e outra com substituição parcial de agregados por resíduos recicláveis. A metodologia consistiu na exposição simultânea dos protótipos a condições ambientais reais, monitorando a variação da temperatura interna por meio de sensores eletrônicos conectados a um sistema de aquisição de dados. Os resultados mostraram que a caixa com adição de PET e isopor manteve temperaturas internas inferiores, evidenciando redução da transferência de calor e melhoria do conforto térmico. Conclui-se que a incorporação de materiais recicláveis em argamassas representa uma alternativa viável, econômica e sustentável para otimização energética em projetos de Engenharia Mecânica.

PALAVRAS-CHAVE: Conforto térmico; Eficiência térmica; Materiais recicláveis.

ABSTRACT: Thermal efficiency is a central concept, particularly in construction systems and devices requiring temperature control, reduced energy losses, and improved thermal comfort. Proper management of heat transfer contributes to sustainability and energy performance in buildings and equipment. In this context, recyclable materials have shown promise as additives in mortars, offering the potential to combine thermal performance, comfort, and environmental responsibility. This study investigates the influence of PET and polystyrene (EPS) on the insulating capacity of mortars, evaluating prototypes built with different coating compositions. Two identical boxes were constructed: one with conventional mortar and the other with partial replacement of aggregates by recyclable waste. The methodology consisted of simultaneously exposing the prototypes to real environmental conditions, monitoring internal temperature variations through electronic sensors and a data acquisition system. Results showed that the box containing PET and EPS maintained lower internal temperatures, demonstrating reduced heat transfer and enhanced thermal comfort. It is concluded that using recyclable materials in mortars represents a viable, economical, and sustainable alternative for energy optimization in Mechanical Engineering projects.

KEYWORDS: Thermal comfort; Thermal efficiency; Recyclable materials.

¹Graduando do Curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário Campo Real. E-mail: engm-gustavopadilha@camporeal.edu.br.

²Graduada em Engenharia Mecânica. Mestra em Engenharia Mecânica. Professora do Curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário Campo Real. E-mail: prof_jessicavasconcelos@camporeal.edu.br.

1 INTRODUÇÃO

O conforto térmico é um dos principais fatores relacionados à qualidade de vida e à eficiência energética em ambientes internos. A redução da transferência de calor entre o meio externo e o interno está diretamente ligada ao uso de materiais com bom desempenho em isolamento térmico. Nos últimos anos, pesquisadores têm buscado alternativas que conciliem eficiência térmica, viabilidade econômica e responsabilidade ambiental. Nesse contexto, o reaproveitamento de resíduos recicláveis, como o Polietileno Tereftalato (PET) e o Poliestireno Expandido (EPS/Isopor), surge como uma estratégia promissora, uma vez que esses materiais apresentam baixa condutividade térmica e podem contribuir para a melhoria do desempenho energético das estruturas, além de auxiliar na gestão de resíduos (AKKOURI et al., 2022).

Um dos grandes desafios da engenharia moderna está relacionado ao controle do conforto térmico e à eficiência energética em sistemas e ambientes. Em regiões de clima tropical, como é o caso de grande parte do território brasileiro, as variações de temperatura podem interferir significativamente na qualidade de vida dos usuários e no consumo de energia com sistemas de climatização. Diante disso, o isolamento térmico eficiente torna-se uma prioridade, especialmente quando se busca reduzir o uso de materiais com alto impacto ambiental (LEITE PIRES et al., 2024).

Nesse contexto, de acordo com Petrella et al. (2025), o uso de argamassas com adição de resíduos recicláveis, como o PET e o isopor (poliestireno expandido), surge como uma proposta inovadora e de grande potencial. Esses materiais, quando triturados e incorporados às argamassas, podem alterar suas propriedades térmicas, conferindo maior isolamento e contribuindo para a redução da troca de temperatura entre ambientes internos e externos. Além disso, seu uso contribui para a redução do volume de resíduos depositados em aterros sanitários, promovendo um ciclo mais sustentável e inteligente de reaproveitamento de materiais.

Diante do exposto, o presente estudo justifica-se pela necessidade de se buscar alternativas sustentáveis para o conforto térmico, especialmente no que se refere ao desempenho de estruturas utilizadas para isolamento térmico. A substituição parcial dos agregados convencionais da argamassa por materiais recicláveis pode representar uma solução de baixo custo, viável e tecnicamente

eficiente, além de contribuir com políticas ambientais e com a inovação tecnológica na área da engenharia mecânica.

O objetivo desta pesquisa é analisar o comportamento térmico de protótipos de caixas confeccionadas a partir de argamassas com adição de PET e isopor triturados em comparação à caixas com revestimentos convencionais, visando identificar sua possível viabilidade de uso. Para tanto, busca-se comparar a eficiência do isolamento térmico das diferentes composições sob as mesmas condições ambientais, identificando o desempenho em termos de condutividade e estabilidade térmica. Considera-se que os resultados obtidos possam fornecer subsídios para novas aplicações de materiais recicláveis em sistemas de isolamento, contribuindo para a eficiência energética, a redução de impactos ambientais e o avanço científico no campo da engenharia.

Ao final do projeto, espera-se que os resultados obtidos possam contribuir para a sustentabilidade em sistemas de isolamento térmico, ao propor alternativas para o reaproveitamento de resíduos plásticos de forma segura e eficiente, contribuindo não apenas para o avanço tecnológico do setor, mas também para a preservação ambiental. O estudo pretende ainda incentivar novas pesquisas voltadas à sustentabilidade e à eficiência energética de sistemas térmicos e edificações, alinhando-se aos princípios do desenvolvimento sustentável e às exigências contemporâneas de inovação responsável.

2 METODOLOGIA

A presente pesquisa experimental tem caráter qualitativo e quantitativo. No escopo qualitativo, busca-se descrever e compreender os fundamentos teóricos que embasam o uso de resíduos poliméricos (PET e EPS/isopor) como aditivos em argamassas para fins de isolamento térmico, relacionando conceitos de transferência de calor, propriedades térmicas dos materiais e conforto térmico. Já no que se relaciona ao seu caráter quantitativo, buscou-se analisar variações quanto aos valores médios, desvio-padrão, mínimo, máximo e a diferença nas temperaturas registradas em ambas as caixas pelos sensores durante o experimento prático; em caráter experimental, foram confeccionados e comparados dois protótipos de caixa com objetivos de avaliar o desempenho térmico: (I) caixa revestida com argamassa convencional; (II) caixa revestida com argamassa contendo adição de PET e isopor triturados. A importância metodológica do trabalho está em demonstrar passo a

passo a viabilidade técnica (construção, instrumentação e medição) e o método de tratamento dos dados que permite comparar o comportamento térmico das duas soluções.

2.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Os mecanismos de transferência de calor existentes e estudados são três: condução, convecção e radiação. Entender cada um desses conceitos é crucial para estudos que tenham como objetivo o controle térmico, tal qual como propõe a presente pesquisa. A condução ocorre dentro do corpo sólido, quando há diferença de temperatura entre regiões adjacentes; já a convecção envolve o movimento de fluido (ar, água) que transporta calor; e a radiação refere-se à emissão de energia eletromagnética por corpos quentes (ASHRAE, 2024; BRAZ et al., 2025).

Figura 1 - Representação esquemática dos mecanismos de transferência de calor.



Fonte: Braz et al. (2025).

No contexto de argamassas modificadas com resíduos, a condução pode ser alterada pela inclusão de partículas de PET ou isopor que reduzem a densidade e criam microbolhas de ar, favorecendo menor condutividade térmica. Em trabalho recente, Guilherme et al. (2024) avaliaram argamassas de revestimento com vermiculita expandida como agregado fino, mostrando redução significativa no fluxo de calor por condução. Esse estudo evidencia como substituições no material podem modular esse mecanismo.

A convecção, embora mais presente em espaços de ar ou vazio dentro de estruturas, também se torna relevante em protótipos com interstícios ou

microcâmeras, onde o ar pode aquecer e circular, contribuindo para o transporte de calor interno (ASHRAE, 2024). Em regiões tropicais, a convecção natural através de aberturas ou fendas pode amplificar ou mitigar acúmulo de calor interno, dependendo do *design* arquitetônico.

A radiação térmica entre as superfícies internas e externas também influencia fortemente o balanço térmico de protótipos de caixas ou caixas-isolantes: superfícies externas que recebem radiação solar direta aquecem a estrutura, que então irradia para o interior; materiais que refletem ou absorvem menos ajudam a mitigar isso (VIEIRA et al., 2025). Em estudo de desempenho térmico de construções de *wood-frame* com materiais de mudança de fase no clima subtropical brasileiro, Vieira et al. (2025) destaca a importância da radiação solar e da absorção térmica dos protótipos comparados aos convencionais.

2.1.1 Conforto Térmico

O conforto térmico refere-se à condição na qual os seres humanos se sentem satisfeitos com o ambiente térmico, sem sensação de frio ou calor excessivos, considerando temperatura do ar, umidade, ventilação e radiação (OLIVEIRA et al., 2024). Esse conceito é importante para avaliar a eficiência térmica, uma vez que o conforto interno dependerá não só da temperatura do material, mas de como ele interage com o ambiente circundante.

Outro aspecto relevante é o uso de índices de conforto térmico, que combinam variáveis ambientais para estimar a sensação humana. No Rio de Janeiro, Moreira et al. (2024) analisaram índices como PET (*“Physiologically Equivalent Temperature”*), HI (*“Heat Index”*) entre outros, durante ondas de calor, identificando que esses índices ultrapassam limites críticos em vários bairros urbanos, o que evidencia a necessidade de materiais e construções com bom isolamento térmico.

Por fim, conforto térmico também se relaciona à saúde pública: condições térmicas desfavoráveis aumentam riscos para doenças respiratórias e cardiovasculares. Requia et al. (2024) encontraram associações entre exposições a índices de desconforto térmico altos e aumento de mortalidade em diversas regiões do Brasil. Isso reforça que o conforto térmico não é apenas questão de bem-estar, mas de impacto social.

2.1.2 Propriedades Térmicas dos Materiais

As propriedades térmicas dos materiais, como condutividade térmica, difusividade, calor específico e densidade, são determinantes para quantificar o desempenho de isolantes ou argamassas modificadas. Materiais com baixa condutividade e baixa densidade tendem a retardar a transferência de calor por condução e reduzir o acúmulo de calor interno (GUILHERME et al., 2024).

Guilherme et al. (2024) analisaram argamassas de revestimento com vermiculita expandida como agregado fino, encontrando que a troca de parte do agregado convencional pela vermiculita reduz a condutividade térmica da argamassa, sem comprometer drasticamente algumas propriedades mecânicas. Esse tipo de estudo é diretamente relevante para argamassas com PET ou isopor.

No estudo de Vieira et al. (2025), a introdução de materiais de mudança de fase (PCMs, do inglês *Phase Change Materials*) em construções *wood-frame* demonstrou aumento da capacidade de armazenamento térmico e maior inércia térmica, resultando em menores variações de temperatura interna durante ciclos diurnos-noturnos. Esses materiais são substâncias capazes de armazenar e liberar energia na forma de calor latente durante a mudança de fase física, geralmente entre os estados sólido e líquido, mantendo a temperatura praticamente constante durante esse processo. Essa característica permite que os PCMs atuem como reguladores térmicos, absorvendo calor quando a temperatura ambiente se eleva e liberando-o quando ela diminui, contribuindo para a eficiência energética e estabilidade térmica de edificações. Isso mostra uma possível estratégia para as argamassas alteradas (RODRÍGUEZ; BUSTOS; CLOUTIER, 2023).

Além disso, a capacidade térmica (ou calor específico) do material passa a ter um papel mais destacado quando há mudanças rápidas de temperatura externa, como picos de calor, pois esse atributo ajuda a amortecer a variação interna (VIEIRA et al., 2025).

O PET e EPS (isopor) são materiais altamente inflamáveis, liberando gases tóxicos e propagando fogo com facilidade. No entanto, ao serem triturados e incorporados em argamassa, essa inflamabilidade é reduzida, pois a matriz cimentícia age como barreira térmica. Essa solução é eficaz em protótipos de caixas isolantes térmicas, onde o plástico serve como agregado leve, sem formar camadas contínuas inflamáveis. Estudos recentes mostram que argamassas com resíduos plásticos mantêm desempenho térmico e resistem melhor ao fogo, desde que bem

dosadas. A matriz mineral protege as partículas plásticas, retardando a propagação das chamas e melhorando a segurança do material final (MOHAMMED et al., 2023).

Por fim, a densidade e a porosidade são propriedades físicas que se correlacionam fortemente com a condutividade térmica: materiais mais porosos, com bolhas de ar (como os obtidos com isopor), reduzem a densidade e as vias de condução térmica, favorecendo desempenho isolante. Estudos recentes de argamassas ou misturas com agregados leves confirmam essa tendência (MYDIN et al., 2023; LI et al., 2023; XU et al., 2024).

2.1.3 Isolamento Térmico e Sustentabilidade

O isolamento térmico refere-se ao uso de materiais que reduzem o fluxo de calor entre ambientes internos e externos, promovendo conforto com menor uso de energia para condicionamento (VIEIRA et al., 2025). Quando esse isolamento incorpora resíduos recicláveis, como PET ou isopor, há duplo benefício: desempenho térmico e redução do impacto ambiental.

Em estudos recentes, a substituição parcial de agregados por materiais leves ou reciclados demonstrou viabilidade técnica para isolamento térmico. Guilherme et al. (2024) mostraram que argamassas com vermiculita reduzem a transmissão de calor, sugerindo que resíduos com estrutura similar (ar e leves) possam ter efeito equivalente ou complementar.

O uso de PCMs, em conjunto com boas práticas de isolamento, também aparece nas pesquisas como uma estratégia sustentável para o controle térmico em edificações. Vieira et al. (2025) verificaram que, em climas tropicais e subtropicais, os PCMs ajudam a manter temperaturas internas mais estáveis, reduzindo oscilações e, conseqüentemente, a demanda energética para climatização.

Conforme destacado por Silva (2021), desde o ano de 2010, a partir da aprovação da Lei nº 12.305, conhecida como “Política Nacional de Resíduos Sólidos no Brasil”, estabelecem-se obrigatoriedades em relação ao reaproveitamento de materiais recicláveis, como é o caso do PET e do isopor. A redução dos impactos ambientais provenientes da destinação correta de resíduos é um dos objetivos e metas propostos pela Agenda 2030, uma iniciativa da Organização das Nações Unidas (2015).

Segundo destaca Marcelino et al. (2025), somente no ano de 2024 o país reciclou cerca de 410 mil toneladas das embalagens PET produzidas, chegando a

14% do total produzido no país. Já no que se relaciona ao EPS, apesar da taxa de reciclagem chegar próxima dos 30%, a indústria nacional encontra desafios quanto ao seu reaproveitamento, conforme cita a AMBIPAR (2025), especialmente no que se relaciona ao seu emprego dentro da área da construção civil, assim como propõe a realização deste estudo.

Por fim, políticas públicas e certificações ambientais reforçam a adoção de materiais sustentáveis, estimulando edifícios energeticamente eficientes, o uso de resíduos e incentivos fiscais. Níveis de conforto térmico elevados ou isolamento inadequado podem levar ao desperdício energético, contrariando metas de sustentabilidade, e os índices de conforto térmico relacionados à saúde também pressionam por soluções construtivas mais verdes (YE et al., 2024; ADIGÜZEL ISTIL; GÓRECKI; DIEMER, 2023).

2.1.4 Instrumentação e Medição de Temperatura

A instrumentação para medir temperatura em estudos de isolamento térmico inclui sensores como termopares, termistores, sensores de resistência (RTDs), sensores infravermelhos e *dataloggers*. A exatidão, resposta temporal e calibração desses instrumentos afetam diretamente a confiabilidade dos dados experimentais (ASHRAE, 2024).

Ensaio recentes de medição de transferência de calor em argamassas ou revestimentos utilizam câmeras térmicas ou sensores distribuídos para capturar perfis de temperatura em várias camadas do material, tanto na face exposta quanto na interna. Em Guilherme et al. (2024), para avaliar argamassas com vermiculita, foi utilizado sensor de temperatura em diferentes profundidades da argamassa para medir variação térmica induzida por radiação solar.

Além disso, a instrumentação deve levar em conta variáveis ambientais que influenciam medições: umidade, radiação, vento, e radiação incidente. Estações meteorológicas ou sensores ambientais externos são frequentemente integrados para correlação dos dados de temperatura do material com condições externas (OLIVEIRA et al., 2024). No uso de PCMs e materiais compósitos, medições de temperatura também servem para verificar o atraso térmico (*“lag time”*) entre pico térmico externo e interno, de modo a estimar a capacidade de isolamento em condições reais de uso (VIEIRA et al., 2025).

Considerações de calibração e precisão também são importantes: instrumentos com erro de calibração ou sensores mal posicionados podem introduzir vieses. Em estudos de conforto térmico urbano em grandes cidades, como no Rio de Janeiro, verificou-se que diferenças de localização de sensores (sombra, exposição ao sol) alteram bastante os resultados de temperatura aparente ao usuário (MOREIRA et al., 2024).

2.2 CONSTRUÇÃO DOS PROTÓTIPOS

Para a construção das duas estruturas utilizadas nesta pesquisa foram utilizados os materiais listados na Tabela 1.

Tabela 1 - Materiais empregados para a montagem das estruturas.

N	MATERIAL (IS)	QUANTIDADE
1	Chapa de MDF	1 unidade
2	Sacos de argamassa AC2	2 unidades
3	Telhas de fibra de cimento de 6mm	2 unidades
4	Ripas de madeira	16 unidades
5	Parafusos	50 unidades
6	Folha de lixa 60	1 unidade
7	Saco de PET triturado	½ saco
8	Saco de isopor triturado	½ saco
9	Fita de acabamento e fixação (<i>Drywall</i>)	4 metros
10	Cimento	5 kg
11	Areia média	5 kg
12	Esmalte sintético branco	1 L
13	Tinta para telhado	1 L

Fonte: O autor (2025).

As caixas foram montadas a partir do corte das chapas de MDF com medidas de 50cm x 50cm, parafusadas com reforço interno de ripas de madeira em cada canto. Em seguida, as superfícies internas foram lixadas com lixa 60 e preparadas

para receber a primeira camada de argamassa aplicada com ferro dentado. Após a secagem inicial, foi feita a aplicação de fita de junta nos cantos internos para garantir melhor vedação e aderência entre os elementos.

A Figura 2 mostra o preparo de ambas as caixas utilizadas neste estudo antes do preparo com os materiais elencados para a construção de ambos os experimentos. Observa-se a parte interna com a primeira demão de argamassa e as paredes externas já pintadas com o esmalte sintético branco, sendo estas registradas pelo autor.

Figura 2 - Preparo inicial das caixas antes da realização dos experimentos.



Fonte: O autor (2025).

A primeira caixa, com proposta sustentável, foi finalizada com a aplicação de uma mistura contendo os materiais presentes no Quadro 1.

Quadro 1 - Materiais utilizados para o revestimento do protótipo sustentável.

N	MATERIAL	QUANTIDADE
1	Argamassa AC2	1 saco
2	PET triturado	½ saco
3	Isopor triturado	½ saco
4	Cimento	2,5 Kg
5	Areia média	2,5 Kg

Fonte: O autor (2025).

A proporção estimada de materiais recicláveis (PET e isopor) foi de aproximadamente 40% do volume total da mistura, chegando a esta conclusão por

meio de tentativa e erro. Foram feitas tentativas de 60% e 50% de materiais tentando aproveitar ao máximo a quantidade de resíduos plásticos, mas somente com os 40% foi possível sem causar problemas com a consistência da mistura e na sua fixação.

Os materiais utilizados na segunda caixa são mostrados no Quadro 2.

Quadro 2 - Materiais utilizados para o revestimento do segundo protótipo.

N	MATERIAL	QUANTIDADE
1	Argamassa AC2	1 saco
2	Cimento	2,5 Kg
3	Areia média	2,5 Kg

Fonte: O autor (2025).

Ambas as estruturas receberam telhas de fibra de cimento de 6 mm, devidamente cortadas e pintadas com tinta específica para telhado. Também foram utilizadas 8 ripas de madeira em cada estrutura (4 em cada base) para melhorar a estrutura e também sendo utilizadas como base na espessura do revestimento dentro da estrutura para padronização. A pintura das chapas de MDF foi feita com esmalte sintético branco. A Figura 3 apresenta ambas as caixas preparadas antes do início dos experimentos.

Figura 3 - Caixas preparadas para o experimento.



Fonte: O autor (2025).

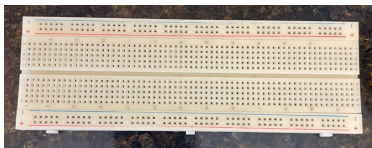
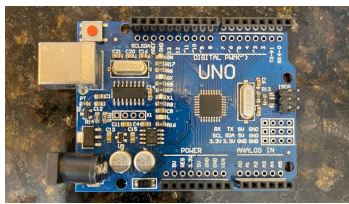

Observou-se que o tempo de cura da argamassa convencional (sem recicláveis) foi de aproximadamente 90 horas. Por outro lado, a mistura com PET e isopor triturado apresentou um tempo de cura inferior, atingindo estabilidade e secagem em cerca de 48 horas. Estudos indicam que a introdução de materiais poliméricos pode influenciar diretamente a porosidade e o tempo de secagem da argamassa, favorecendo um processo mais rápido (DI MAGGIO et al., 2024).

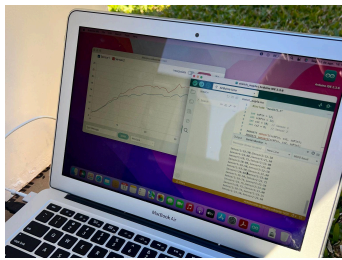


As caixas foram mantidas sob abrigo durante a cura, com ventilação natural e sem contato direto com umidade externa, após todo este processo de secagem, foi finalizada a pintura das chapas de MDF com esmalte sintético branco, ficando prontas para o início dos experimentos.

2.3 COLETA E TRATAMENTO DE DADOS

O Quadro 3 apresenta de forma sintetizada os materiais empregados para a etapa de realização dos testes experimentais propostos por este estudo.

Quadro 3 - Materiais empregados para a execução de testes experimentais.

N	MATERIAL	REPRESENTAÇÃO	FINALIDADE	QUANTIDADE
1	Placa protoboard 830 furos		Conexão dos componentes	1 unidade
2	Placa Arduino UNO		Aquisição e registro de dados	1 unidade
3	Cabo USB		Conexão e exportação de dados	1 unidade
4	Jumpers		Ligação dos sensores ao Arduino	1 unidade

5	Software Arduino IDE		Programação e leitura dos sensores	Material de uso permanente
6	MacBook		Coleta e processamento de dados	1 unidade
7	Termopares		Sensor de temperatura	2 unidades

Fonte: O autor (2025).

Para o monitoramento térmico, foram utilizados dois sensores de temperatura (termopares) tipo K (MAX6675), conectados a um microcontrolador Arduino Uno, ambos posicionados igualmente no centro dos protótipos, por baixo da base aberta. As leituras de temperatura foram programadas no Software Arduino IDE, sendo registradas em intervalos de 10 minutos ao longo de nove horas de ensaio, compreendendo o período das 09:00h às 18:00h.

O intervalo de 10 minutos foi definido de modo a garantir um equilíbrio entre a quantidade de informações coletadas e a clareza da análise. Intervalos menores poderiam resultar em excesso de dados, dificultando a organização e interpretação, enquanto intervalos maiores, como de 30 minutos ou 1 hora, poderiam comprometer a identificação precisa das variações térmicas ao longo do período de estudo. O intervalo selecionado possibilitou acompanhar o comportamento dos protótipos em diferentes condições do dia, incluindo o período da manhã, o intervalo de maior incidência térmica (entre 12:00h e 16:00h) e o final da tarde, quando as temperaturas começam a declinar.

3 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Durante o experimento, os protótipos foram expostos simultaneamente às mesmas condições ambientais, no período entre 9h00 e 18h00, permitindo a observação do comportamento térmico de ambas as estruturas ao longo das variações de temperatura durante o dia. As leituras indicaram que, nas primeiras horas do dia, as temperaturas internas dos dois protótipos permaneceram praticamente iguais, ambas em torno de 11 °C, acompanhando a temperatura ambiente, que se encontrava próxima de 12 °C.

À medida que a radiação solar aumentou, foi possível observar diferenças significativas entre as amostras. Entre 12h00 e 16h00, período correspondente ao pico térmico externo, com temperatura máxima de aproximadamente 20 °C, a caixa revestida com argamassa convencional atingiu temperaturas internas próximas a 23 °C, enquanto o protótipo confeccionado com adição de PET e isopor triturados manteve a temperatura interna em torno de 19,5 °C. Essa diferença de aproximadamente 3,5 °C evidencia a eficácia do material reciclável em reduzir a transferência de calor por condução, resultado que está em conformidade com o observado em estudos como os de Petrella et al. (2025) e Guilherme et al. (2024), que também identificaram melhoria significativa na resistência térmica de argamassas modificadas com agregados leves.

No contexto de avaliação de desempenho térmico de materiais e sistemas construtivos, existe um parâmetro amplamente utilizado: o *lag time*. Esse conceito refere-se ao intervalo de tempo entre o pico de temperatura externa e o correspondente pico interno, sendo desejável que esse atraso seja significativo, pois indica maior capacidade de isolamento. Durante o pico térmico externo (20 °C, entre 15h e 16h), ambas as caixas responderam quase simultaneamente, não apresentando lag time perceptível (0 h). Contudo, observou-se diferença expressiva na intensidade do pico interno: enquanto a caixa convencional atingiu cerca de 23 °C, a caixa com PET e isopor registrou 19,5 °C. Esse comportamento demonstra que, embora não tenha ocorrido atraso térmico, houve diminuição do pico de temperatura, o que confirma a eficiência isolante dos materiais recicláveis incorporados à argamassa.

De forma complementar, o comportamento térmico durante o período de resfriamento (após as 17h00) também indicou desempenho superior da caixa sustentável. A caixa convencional apresentou queda de temperatura mais rápida,

enquanto a caixa com PET e isopor manteve o calor por mais tempo, evidenciando maior estabilidade térmica e capacidade de retenção do calor interno. Esse resultado reforça que o uso de resíduos poliméricos contribui para aumentar a inércia térmica do sistema, característica desejável em aplicações de isolamento.

A Tabela 2 apresenta os registros de temperatura obtidos nas duas caixas testadas, cada uma com um tipo de revestimento diferente: a Caixa A, com revestimento de PET e isopor, e a Caixa B, com revestimento de argamassa convencional. Para cada caixa foram realizadas 56 medições de temperatura, e a partir desses valores, calcularam-se parâmetros descritivos. A média indica a temperatura média registrada em cada condição experimental, enquanto o desvio-padrão (DP) expressa a dispersão dos valores em torno da média, quanto maior o DP, maior a variabilidade das temperaturas. Os valores mínimo e máximo correspondem, respectivamente, às menores e maiores temperaturas observadas, fornecendo uma indicação da amplitude das variações.

A normalidade dos dados foi verificada pelo Teste de *Shapiro–Wilk*, realizado com o auxílio do *software* R, o qual determina se os valores seguem uma distribuição normal. Valores de p inferiores a 0,05 indicam que os dados não seguem essa distribuição. Para avaliar se houve diferença significativa entre as caixas, foi aplicado o Teste T para duas amostras independentes, que fornece um valor de p ; quando $p < 0,05$, a diferença entre as médias é considerada estatisticamente significativa (CHICCO; SICHENZE; JURMAN, 2025).

No presente experimento proposto por este estudo, o Teste t retornou um valor de $p = 0,008$, demonstrando que a diferença entre ambas as caixas preparadas e testadas é estatisticamente significativa, ou seja, com diferença superior a 95% entre ambas as médias registradas durante o período de análise. Observa-se ainda que a Caixa A (PET + Isopor) manteve temperaturas, em média, cerca de 2 °C abaixo em comparação a Caixa B (Argamassa), evidenciando a capacidade maior nesta no que se relaciona a eficiência do revestimento com PET e isopor na manutenção do isolamento térmico. Todos os dados detalhados obtidos ao longo do experimento, sendo média, desvio-padrão - DP, valores de mínimo e máximo, testes de normalidade e significância estatística, além das medições individuais realizadas a cada 10 minutos durante as 9 horas de experimento, estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Temperaturas registradas em diferentes momentos pelos sensores A e B do experimento.

LEITURA REALIZADA (Nº)	Temperatura (em °C) registrada no sensor A (PET + Isopor)	Temperatura (em °C) registrada no sensor B (Argamassa)
1	11,75	12,75
2	11,5	12,5
3	8,75	8,25
4	9,5	9
5	9,5	9,5
6	10	9,75
7	10,75	10,5
8	11,5	11,25
9	12	12,25
10	13	13,5
11	13,5	14
12	14,5	15,25
13	14,75	15
14	15,75	16,75
15	16	16,75
16	16,5	17,5
17	16,25	18,5
18	17	18,5
19	17,25	19,25
20	17	19,25
21	17,25	19,75
22	18	20,25
23	18	20,5
24	18	20,5
25	18,25	20,25
26	18,25	20,75
27	18,5	20,25
28	18,75	20,75
29	18,25	20,5
30	18,5	19,5
31	18,5	20,25
32	19,25	21
33	19,5	22,5
34	19	21,5

35	19,75	22
36	20	22
37	19,5	22,5
38	19,5	22
39	20	23
40	19,5	22,75
41	19,75	22,5
42	19,75	23
43	19,75	23
44	19,75	23,25
45	19,5	23,5
46	19,5	22,75
47	19,5	23
48	19,25	22,5
49	18,25	22,5
50	17,75	22
51	17,5	21,5
52	17,5	21
53	17,25	20
54	16,75	19
55	16,25	18
56	16	17,75
MÉDIA	16,73	18,70
DP	3,18	4,29
MÍN.	8,75	8,25
MÁX.	20	23,5
p	0,0000032	0,0005
Teste T		0,008*

°C - Graus Celsius; Méd. - Média; DP - Desvio-Padrão; Mín. - Mínimo; Máx. - Máximo. p - Normalidade dos dados avaliados por meio do Teste de Shapiro-Wilk; *Diferença estatisticamente significativa mensurada por meio do Teste T ($p < 0,05$).

Fonte: O autor (2025).

Durante os ensaios, os protótipos foram posicionados em área aberta, expostos diretamente à radiação solar, de modo a reproduzir condições ambientais reais. O sistema foi alimentado por cabo USB conectado ao computador, permitindo a aquisição contínua de dados. Ao término da coleta, os registros foram organizados

em planilhas eletrônicas e tratados estatisticamente, possibilitando a elaboração de gráficos comparativos da variação de temperatura entre os dois protótipos.

Figura 4 - Aparatos finalizados para a execução prática do estudo.



Fonte: O autor (2025).

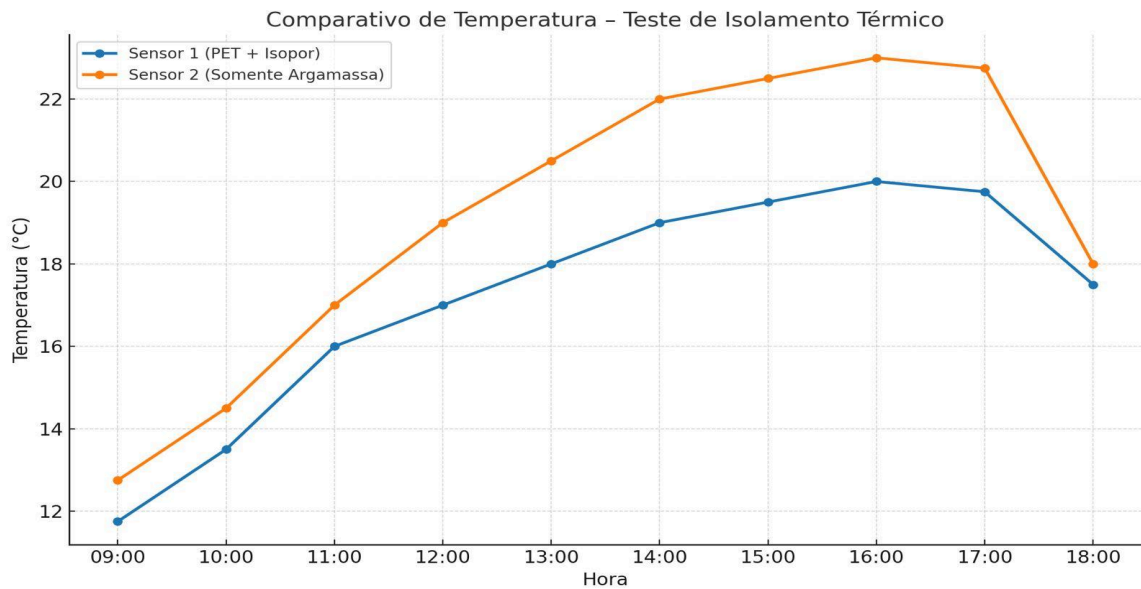
Os ensaios experimentais foram conduzidos ao longo de nove horas consecutivas, sem interferências externas que pudessem comprometer os resultados. As caixas permaneceram fechadas durante todo o período de teste, sendo abertas apenas ao término da coleta de dados. Os sensores de temperatura (termopares) foram posicionados igualmente sob o centro de cada caixa, garantindo condições idênticas de medição. Dessa forma, assegurou-se que as variações registradas refletissem exclusivamente o efeito do isolamento térmico das argamassas avaliadas, reforçando a confiabilidade e a reprodutibilidade do experimento.

Os resultados comprovam a viabilidade técnica do uso de resíduos recicláveis como componentes de argamassas isolantes. A adição de PET e isopor reduziu a condutividade térmica e aumentou o tempo de resposta ao aquecimento e ao resfriamento, confirmando a hipótese inicial do estudo. Esses achados estão em concordância com a literatura, evidenciando que o reaproveitamento de materiais poliméricos pode aliar eficiência energética, redução de impactos ambientais e inovação tecnológica.

As imagens gráficas apresentadas a seguir reforçam o comportamento térmico registrado durante o experimento, permitindo visualizar as variações de temperatura ao longo do dia e as diferenças de desempenho entre os revestimentos testados. Observa-se o comportamento mais estável da Caixa A, com PET e isopor,

em relação à Caixa B, de argamassa convencional, confirmando a maior eficiência térmica do material modificado.

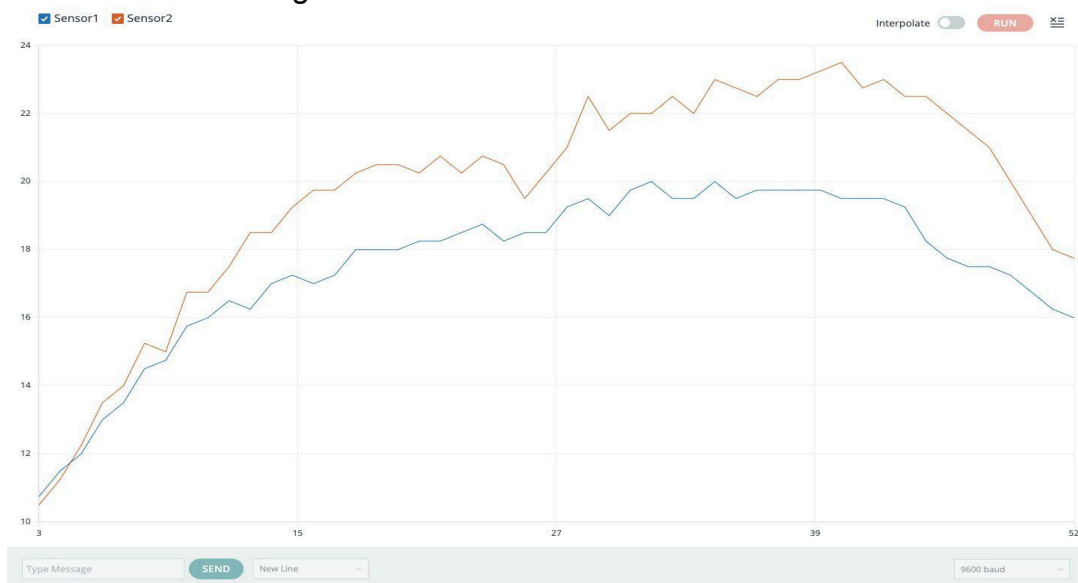
Figura 5 - Comparativo dos valores coletados com intervalo de tempo de 1 hora.



Fonte: O Autor (2025).

Os gráficos presentes nas Figuras 5 e 6 foram pensados e projetados de forma para auxiliar a compreensão e facilitar a visualização de todos os resultados obtidos e do comportamento das temperaturas ao longo do experimento realizado.

Figura 6 - Gráfico software Arduino IDE



Fonte: Software Arduino IDE (2025).

A Figura 5 apresenta o gráfico consolidado com todos os resultados do experimento, organizado em intervalos de tempo maiores para facilitar a interpretação geral do comportamento térmico dos protótipos. Já a Figura 6 mostra o gráfico gerado diretamente no software Arduino IDE, no qual são exibidas as curvas de temperatura registradas ao longo das nove horas de ensaio, com medições realizadas a cada 10 minutos.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos neste estudo evidenciam que a utilização de resíduos recicláveis, como PET e isopor triturados, em argamassas de revestimento é uma alternativa promissora para a melhoria do desempenho térmico em sistemas construtivos. A comparação entre os protótipos demonstrou que a caixa confeccionada com aditivos sustentáveis apresentou temperaturas internas inferiores durante o pico térmico e maior estabilidade durante o resfriamento, comprovando sua capacidade de reduzir a transferência de calor e aumentar a inércia térmica do conjunto. Esses resultados confirmam a viabilidade técnica da proposta e reforçam seu potencial como solução sustentável, econômica e aplicável em diferentes contextos da Engenharia Mecânica e da construção civil.

Além da contribuição prática, o reaproveitamento de resíduos poliméricos representa um avanço importante no âmbito ambiental, reduzindo o descarte inadequado de materiais e incentivando a adoção de práticas alinhadas à economia circular e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

Como pesquisas futuras, sugere-se a ampliação dos ensaios experimentais com diferentes proporções de PET e isopor, a avaliação de outras tipologias de resíduos recicláveis, como fibras vegetais, borracha moída e cinzas industriais e o estudo comparativo entre diferentes tipos de argamassa e revestimentos. Recomenda-se também a realização de análises complementares, como testes de condutividade térmica direta, resistência mecânica, durabilidade e comportamento frente à umidade. Outra perspectiva relevante consiste na aplicação de modelagem computacional (simulações térmicas via softwares) para prever o comportamento térmico em diferentes condições climáticas e geográficas. Por fim, futuras pesquisas podem explorar a integração desses materiais em sistemas de automação e monitoramento inteligente, associando sensores e algoritmos de controle térmico, de modo a aprimorar a eficiência energética de edificações e equipamentos.

Dessa forma, o presente trabalho contribui não apenas para o avanço científico no campo da eficiência térmica, mas também para a consolidação de soluções inovadoras e ambientalmente responsáveis, que unem engenharia, sustentabilidade e tecnologia em prol de um desenvolvimento mais equilibrado e eficiente.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

ADIGÜZEL İSTİL, Ş.; GÓRECKI, J.; DIEMER, A. **Study on Certification Criteria of Building Energy and Environmental Performance in the Context of Achieving Climate Neutrality**. Sustainability, v. 15, n. 3, p. 2770, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su15032770>. Acesso em: 12 nov. 2025.

AKKOURI, N.; BOURZIK, O.; BABA, K.; TAYEH, B. A. **Thermophysical characteristics of eco-friendly mortars containing recycled PET as partial sand replacement in dry and wet conditions**. Innovative Infrastructure Solutions (2022) 7:238. Disponível em: <https://10.1007/s41062-022-00838-4.pdf>. Acesso em: 10 set. 2025.

AMBIPAR. **From villain to runner-up in recycling**. 2025. Disponível em: <https://ambipar.com/en/noticias/from-villain-to-runner-up-in-recycling-styrofoam-is-circulating-again/>. Acesso em: 12 nov. 2025.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE Handbook – HVAC Systems & Equipment**. Peachtree Corners, GA: ASHRAE, 2024. Disponível em: <https://www.ashrae.org/>. Acesso em: 10 set. 2025.

BRAZ, G.; JOSÉ, H.; DANTAS, M.; JUNIOR, M. **Isolante Cortividro Para Proteção Térmica Do Defletor Do Coletor**. Cadernos de Graduação Inova +, UniSenai/PR, V. 6, N. 1, p. 147-175, fevereiro 2025. Disponível em: <http://app.fiepr.org.br/revistacientifica/index.php/inovamais/article/view/1028>. Acesso em: 17 set. 2025.

CHICCO, D.; SICHENZE, A.; JURMAN, G. **A simple guide to the use of Student's t-test, Mann-Whitney U test, Chi-squared test, and Kruskal-Wallis test in biostatistics**. BioData Mining, 18, 56 (2025). Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s13040-025-00465-6>. Acesso em: 12 nov. 2025.

DA SILVA DÁVILA, J.; et al. **The thermal comfort of pedestrians in a humid subtropical climate according to different thermal perception ratings**. Int. J.

Biometeorol., 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00484-023-02614-0>. Acesso em: 11 set. 2025.

DI MAGGIO, R.; MARACCHINI, G.; COTINI, O.; ALBATI, R. **Cement Pastes with Hygroscopic Polymeric Additions for Potential Building Applications**. Appl. Sci. 2024, 14, 853. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/2/853>. Acesso em: 17 set. 2025.

GUILHERME, D. D. P.; et al. **Heat transfer evaluation of coating mortars containing expanded vermiculite**. Construction and Building Materials, 2024. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061824007219>. Acesso em: 11 set. 2025.

LEITE PIRES, C.; DE PAIVA, W.; DINIZ DE ANDRADE MEIRA, F. F.; GALDINO FARIAS, G. M.; LEAL DUARTE, G. C.; LEAL DOS SANTOS, L. **Avaliação do potencial de substituição parcial do agregado miúdo pelo resíduo de poliestireno expandido (isopor) em argamassas**. Revista Geama, [S. l.], v. 10, n. 1, p. 4–9, 2024. Disponível em: <https://www.journals.ufrpe.br/index.php/geama/article/view/6001> Acesso em: 10 set. 2025.

LI, L.; WANG, W.; WANG, Y.; LI, D.; ZHUANG, M. L. **Experimental study on pore structure characteristics and thermal conductivity of foamed concrete reinforced with fibers**. Plos one, 07 Jul 2023, 18(7):e0287690. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0287690>. Acesso em: 12 nov. 2025.

MARCELINO, C. S.; GOMES, V. E. D. S.; MARANGONI JÚNIOR, L. **Post-Consumer Recycled PET: A Comprehensive Review of Food and Beverage Packaging Safety in Brazil**. Polymers, 2025, 17, 594. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym17050594>. Acesso em: 12 nov. 2025.

MOHAMMED, I.I.; NARIMAN, N.A.; SHAKOR, P.; ISMAIL, O.; RIZGAR, K. **Post-Fire Mechanical Properties of Concrete Incorporating Waste EPS (Styrofoam) as Aggregate Replacement**. CivilEng 2023, 4, 359-372. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2673-4109/4/2/21>. Acesso em: 17 set. 2025.

MOREIRA, A. B.; et al. **Atmospheric Conditions Related to Extreme Heat and Human Comfort in the City of Rio de Janeiro (Brazil) during the First Quarter of the Year 2024**. Atmosphere, 2024. <https://doi.org/10.3390/atmos15080973>. Acesso em: 12 set. 2025.

MYDIN, M. A. O.; et al. **Mechanical, durability and thermal properties of foamed concrete: a review.** *Frontiers in Materials*, 2023. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/materials/articles/10.3389/fmats.2023.1158675/full>. Acesso em: 12 nov. 2025.

OLIVEIRA, L. R.; et al. **Spatiotemporal variability in human thermal comfort perception in open-air spaces: application to the state of Minas Gerais, Brazil.** *Int. J. Biometeorol.*, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00484-023-02606-0>. Acesso em: 11 set. 2025.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (OMS). **Transformando nosso mundo: a agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável** [online]. Brasília: Nações Unidas do Brasil, 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/sites/default/files/2020-09/agenda2030-pt-br.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2025.

PETRELLA, A.; TODARO, F.; YADAV, P.; GUBITOSA, J.; NOTARNICOLA, M. **Physical and Mechanical Properties of Cement Mortars with Recycled Polyethylene Terephthalate: Influence of Grain Size and Composition.** *Materials*, 2025, 18, 1378. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma18061378>. Acesso em: 10 set. 2025.

REQUÍA, W. J.; et al. **Thermal Comfort Conditions and Mortality in Brazil.** *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijerph21091248>. Acesso em: 11 set. 2025.

RODRÍGUEZ, G. E.; BUSTOS ÁVILA, C.; CLOUTIER, A. **Use of phase change materials in wood and wood-based composites for thermal energy storage: A Review.** *BioResources*, 18(4), 8781-8805, 2023. Disponível em: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/use-of-phase-change-materials-in-wood-and-wood-based-composites-for-thermal-energy-storage-a-review/>. Acesso em: 12 nov. 2025.

SILVA, M. F. B. **Estudo de técnicas de reciclagem do poliestireno expandido: uma revisão sistemática e uma proposta de reaproveitamento.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, 2021. Disponível em: <https://bdtd.uftm.edu.br/bitstream/123456789/1213/1/DISSERT%20MARIA%20F%20B%20SILVA.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2025.

VIEIRA, J.; et al. **Thermal Performance of Wood Frame Construction with Phase Change Material in the Brazilian Subtropical Climate**. *Materials*, v. 18, n. 3, 2025.

Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma18030681>. Acesso em: 11 set. 2025.

XU, C.; et al. **Characterization and performance evaluation of lightweight thermal insulation recycled concrete**. *Discover Applied Sciences*, 6:282, 2024.

Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42452-024-05938-7>. Acesso em: 12 nov. 2025.

YE, J.; FANYANG, Y.; WANG, J.; MENG, S.; TANG, D. **A Literature Review of Green Building Policies: Perspectives from Bibliometric Analysis**. *Buildings*, v. 14, n. 9, p. 2607, 2024.

Disponível em: <https://doi.org/10.3390/buildings14092607>. Acesso em: 12 nov. 2025.