

DESEMPENHO TÉRMICO E MECÂNICO DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS LEVES COM EPS PARA APLICAÇÃO EM CLIMA QUENTE

**THERMAL AND MECHANICAL PERFORMANCE OF LIGHTWEIGHT
CEMENTITIOUS COMPOSITES WITH EPS FOR APPLICATION IN HOT
CLIMATES**

Engenharias • 21/09/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/789973110](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/789973110)

David Willames do Rego Coimbra¹

Ismeraldo Pereira de Oliveira²

Danilo Teixeira Mascarenhas de Andrade³

José Willian Leal de Araújo⁴

Antonio Carlos da Silva Rosa⁵

Jacó Moreira de Aguiar⁶

Jesué Francisco Lopes Filho⁷

Patrik Anderson Menezes Rios⁸

Ítallo Ferreira de Araujo⁹

Odilon Dantas Aguiar¹⁰

Leonardo da Costa Santos¹¹

RESUMO

O emprego do Poliestireno Expandido (EPS) como substituto parcial do agregado miúdo em matrizes cimentícias constitui uma estratégia para reduzir a massa específica e a condutividade térmica de compósitos destinados a componentes de vedação. Este estudo analisa as propriedades físicas, mecânicas e térmicas de formulações com 0%, 15%, 30% e 45% de substituição volumétrica de areia por EPS, identificadas como T0, T15, T30 e T45. A massa específica diminuiu de 2150 kg/m³ no T0 para 1120 kg/m³ no T45, enquanto a resistência à compressão variou de 28,5 MPa para 3,1 MPa. A condutividade térmica foi reduzida de 1,15 para 0,42 W/m·K. O T30 apresentou 1460 kg/m³, 8,4 MPa e 0,68 W/m·K, constituindo o melhor equilíbrio entre leveza, resposta térmica e resistência dentro do conjunto avaliado. Os mecanismos interfaciais são discutidos à luz da literatura especializada, relacionando porosidade, distribuição do EPS e transferência de tensões. Os resultados demonstram o potencial do compósito para componentes leves de vedação, cuja avaliação normativa deve considerar a configuração completa do sistema construtivo.

Como análise complementar, aplicou-se um modelo paramétrico estacionário de parede revestida, utilizando as condutividades determinadas, as temperaturas máximas médias climatológicas de Teresina e condições de contorno explicitadas. Para um núcleo de 10 cm e temperatura interna de 26 °C, a transmitância térmica diminuiu de 3,53 W/m²·K no T0 para 2,30 W/m²·K no T45. No cenário de agosto, com temperatura externa de 35,5 °C, o fluxo térmico estimado foi reduzido de 33,6 para 21,9 W/m². A modelagem quantificou o efeito comparativo das formulações na transferência de calor e reforçou a seleção do T30 como composição de compromisso.

Palavras-chave: Poliestireno Expandido; concreto leve; matriz

cimentícia; desempenho térmico; resistência à compressão; vedação.

ABSTRACT

Expanded polystyrene (EPS) beads can reduce the density and thermal conductivity of cement-based composites while also affecting stiffness and load-bearing capacity. This study analyses the physical, mechanical and thermal properties of mixtures containing 0%, 15%, 30% and 45% volumetric sand replacement by EPS. Density decreased from 2150 to 1120 kg/m³ and thermal conductivity from 1.15 to 0.42 W/m·K, whereas compressive strength varied from 28.5 to 3.1 MPa. The T30 mixture combined 1460 kg/m³, 8.4 MPa and 0.68 W/m·K, representing the most balanced formulation within the investigated range. Interfacial mechanisms are discussed in relation to porosity, EPS distribution and stress transfer. The results demonstrate the potential of the composite for lightweight non-structural building-envelope components.

A complementary steady-state parametric model was applied to a rendered wall using the measured conductivities, climatological mean maximum temperatures for Teresina and explicitly stated boundary conditions. For a 10-cm core and an indoor reference temperature of 26 °C, U-values decreased from 3.53 W/m²·K for T0 to 2.30 W/m²·K for T45. Under the August scenario, with an outdoor temperature of 35.5 °C, the estimated inward heat flux decreased from 33.6 to 21.9 W/m². The model quantified the comparative thermal effect of the formulations and supported the selection of T30 as the best-performing compromise.

Keywords: expanded polystyrene; lightweight cementitious composite; thermal conductivity; compressive strength; building envelope.

1. INTRODUÇÃO

A construção civil encontra-se diante de um desafio que envolve simultaneamente desempenho, racionalização de recursos, conforto ambiental e redução dos impactos associados ao consumo de materiais. Nesse cenário, o desenvolvimento de compósitos cimentícios com menor massa específica e menor condutividade térmica apresenta interesse crescente, particularmente para aplicações em elementos de vedação e componentes não estruturais. A utilização de materiais leves pode reduzir cargas permanentes e facilitar etapas de transporte e montagem, enquanto a redução da transferência de calor pode contribuir para condições mais favoráveis de conforto térmico no ambiente construído. Em cidades de clima quente, como Teresina-PI, a redução do fluxo de calor através da envoltória assume importância adicional por sua relação com o conforto térmico e com a demanda de resfriamento dos ambientes.

Entre as estratégias disponíveis para produzir compósitos mais leves, destaca-se a incorporação de agregados ou inclusões poliméricas. O Poliestireno Expandido (EPS) apresenta características particularmente interessantes para essa finalidade em razão de sua baixa massa específica, estrutura celular e reduzida capacidade de condução de calor. Quando incorporado a uma matriz à base de cimento, o EPS introduz uma segunda fase com comportamento físico e mecânico muito diferente daquele dos constituintes minerais convencionais. Essa diferença é responsável, simultaneamente, por parte dos benefícios e das limitações do material.

Do ponto de vista físico, a substituição parcial de areia por EPS tende a reduzir a massa específica do compósito de maneira expressiva. A areia constitui uma fase mineral relativamente densa e rígida, enquanto as partículas de EPS apresentam massa específica muito inferior. A substituição, portanto, modifica a fração volumétrica de sólidos minerais, aumenta a quantidade relativa de vazios e altera a conectividade da estrutura porosa. Como consequência, propriedades como absorção de água, porosidade, módulo de elasticidade, resistência mecânica e condutividade térmica podem sofrer mudanças simultâneas.

Do ponto de vista térmico, a presença do EPS é potencialmente vantajosa porque a fase polimérica e o ar aprisionado em sua estrutura dificultam a transferência de calor por condução. Entretanto, a avaliação do desempenho térmico não pode ser dissociada da geometria e da configuração do elemento construtivo. Uma parede real é formada por um sistema constituído por diferentes camadas, espessuras, revestimentos, juntas e interfaces. Dessa forma, uma baixa condutividade térmica do compósito é uma característica favorável, mas não constitui, isoladamente, demonstração de atendimento a todos os requisitos de desempenho de uma edificação.

Sob a perspectiva mecânica, o comportamento é inverso. O aumento do teor de EPS reduz a fração de material mineral capaz de suportar tensões e introduz inclusões muito mais deformáveis do que a matriz cimentícia. Além disso, a interface entre a partícula polimérica e a pasta de cimento pode apresentar maior porosidade e descontinuidades. Essa região, frequentemente denominada zona de transição interfacial (ZTI), pode funcionar como local preferencial para concentração de tensões e desenvolvimento de microfissuras.

O estudo dessa interface é, portanto, fundamental para compreender por que a melhoria do desempenho térmico é acompanhada pela redução da resistência e da rigidez.

A análise microestrutural assume, nesse contexto, papel complementar aos ensaios macroscópicos. A observação da distribuição das partículas, da formação de gaps, da porosidade interfacial, das microfissuras e dos produtos de hidratação permite estabelecer uma relação entre estrutura e propriedade. Essa abordagem é particularmente relevante em materiais multifásicos, nos quais o comportamento final não resulta apenas das propriedades individuais dos constituintes, mas também da qualidade das interfaces e da arquitetura interna do compósito.

No presente estudo, são analisados quatro níveis de substituição volumétrica de areia por EPS: 0%, 15%, 30% e 45%, correspondentes aos traços T0, T15, T30 e T45. A avaliação considera massa específica no estado endurecido, porosidade aberta, resistência à compressão axial, módulo de elasticidade dinâmico e condutividade térmica. Os mecanismos microestruturais são discutidos como interpretação fundamentada na literatura, sem apresentá-los como observações experimentais próprias.

A questão científica central deste trabalho pode ser formulada da seguinte maneira: em que medida o aumento do teor de EPS modifica o equilíbrio entre redução de massa, desempenho térmico e capacidade mecânica do compósito cimentício? A hipótese de trabalho é que exista uma faixa intermediária de substituição capaz de proporcionar redução relevante da densidade e da condutividade térmica sem conduzir a uma perda de resistência incompatível com aplicações de vedação. Nesse contexto, o traço T30 é analisado como

uma composição potencialmente equilibrada dentro do conjunto experimental estudado.

Assim, o objetivo geral é avaliar a influência da substituição volumétrica de areia por EPS nas propriedades físicas, mecânicas e térmicas do compósito. Os objetivos específicos são: quantificar as variações de massa específica e porosidade; analisar o comportamento da resistência e da rigidez; avaliar a redução da condutividade térmica; integrar as propriedades por indicadores relativos; e discutir o potencial de aplicação do traço intermediário em sistemas de vedação.

1.1. Contribuição e Originalidade da Análise

A contribuição do estudo está na integração das propriedades físicas, mecânicas e térmicas em uma análise multicritério aplicada à seleção de compósitos cimentícios leves com EPS. A articulação entre resultados experimentais, interpretação mecanística e modelagem térmica permite comparar as formulações sob critérios simultâneos de massa específica, porosidade, resistência, rigidez e transferência de calor.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Compósitos Cimentícios Leves e Relação Estrutura-Propriedade

Compósitos cimentícios leves podem ser obtidos pela introdução de agregados leves, vazios controlados ou fases poliméricas de baixa massa específica. Em todos os casos, a redução da densidade resulta de uma alteração da quantidade e da natureza das fases presentes no material. A consequência mais importante é que propriedades

mecânicas e térmicas passam a depender fortemente da arquitetura interna do compósito. A literatura sobre materiais cimentícios demonstra que porosidade, conectividade dos poros, distribuição das inclusões e qualidade da interface são parâmetros determinantes para a resposta do material (BABU; BABU; WEE, 2005; PRASITTISOPIN; TERMKHAJORNKIT; KIM, 2022).

A relação entre densidade e resistência não é estritamente linear. À medida que a quantidade de uma fase leve aumenta, diminui a seção efetiva de matriz mineral capaz de transmitir tensões, enquanto a quantidade de descontinuidades aumenta. Por isso, pequenas alterações de densidade podem estar associadas a reduções expressivas de resistência quando a estrutura passa a apresentar maior concentração de vazios ou interfaces frágeis.

2.2. Características do Poliestireno Expandido (EPS)

O EPS é um polímero celular obtido a partir da expansão de partículas de poliestireno, produzindo uma estrutura constituída predominantemente por material polimérico e ar. Essa configuração explica sua baixa massa específica e sua baixa condutividade térmica. Em aplicações cimentícias, o EPS pode ser empregado em forma de pérolas ou partículas incorporadas à matriz, permitindo controlar a densidade final do compósito por meio da substituição parcial de agregados minerais (PRASITTISOPIN; TERMKHAJORNKIT; KIM, 2022; EL GAMAL et al., 2024).

A principal vantagem do EPS para materiais de vedação está na possibilidade de combinar redução de peso com melhoria do isolamento térmico. Em contrapartida, sua baixa rigidez em comparação com agregados minerais reduz a capacidade de

suporte de cargas do compósito. Além disso, a superfície polimérica apresenta características de molhabilidade e aderência diferentes das partículas minerais, o que torna o tratamento da interface um aspecto importante da tecnologia de produção.

2.3. Efeito da Substituição do Agregado Mineral

Quando a areia é substituída volumetricamente por EPS, ocorre uma alteração simultânea na composição sólida e na estrutura de vazios. A fração mineral diminui e a fração polimérica aumenta. Como o EPS possui massa específica muito menor, a densidade global diminui progressivamente. O efeito sobre a resistência ocorre porque a matriz deixa de ser continuamente apoiada por partículas minerais rígidas e passa a conter inclusões deformáveis (EL GAMAL et al., 2024; WEI et al., 2025).

Outro aspecto importante é a possibilidade de formação de vazios em torno das partículas. Durante a mistura e a compactação, a diferença de densidade entre EPS e componentes minerais pode favorecer a movimentação das pérolas. O procedimento de pré-envelopamento utilizado no estudo é relevante justamente porque procura melhorar a aderência inicial entre cimento e EPS e reduzir a segregação.

2.4. Zona de Transição Interfacial (ZTI)

A ZTI é uma região de características distintas daquela observada no interior da pasta cimentícia. Em compósitos com EPS, a interface pode apresentar maior concentração de poros, microvazios e descontinuidades. A existência de gaps ao redor das partículas reduz a área efetiva de contato entre as fases e cria regiões nas quais

as tensões podem se concentrar (PRASITTISOPIN; TERMKHAJORNKIT; KIM, 2022).

Do ponto de vista da mecânica da fratura, uma interface mais fraca pode atuar como caminho preferencial para a propagação de danos. Sob compressão, a deformabilidade do EPS produz uma resposta diferente daquela da matriz mineral. A incompatibilidade de deformações pode favorecer a concentração de tensões na região de contato, enquanto microfissuras preexistentes podem se propagar com o aumento do carregamento.

2.5. Propriedades Térmicas

A transferência de calor em materiais cimentícios porosos ocorre principalmente por condução através das fases sólidas e gasosas. A introdução de EPS aumenta a quantidade relativa de uma fase de baixa condutividade e altera a fração de vazios. Por isso, é esperado que o aumento do teor de EPS provoque redução da condutividade térmica, desde que a estrutura do material permaneça suficientemente homogênea (EL GAMAL et al., 2024; LI et al., 2025).

Essa melhoria térmica, contudo, deve ser interpretada considerando o efeito da umidade. A presença de água nos poros pode modificar significativamente a condutividade térmica, pois a água apresenta capacidade de condução de calor superior à do ar. Assim, comparações entre materiais devem considerar as condições de preparação e ensaio e, sempre que possível, o estado higrométrico das amostras.

2.6. Desempenho Térmico de Sistemas de Vedação

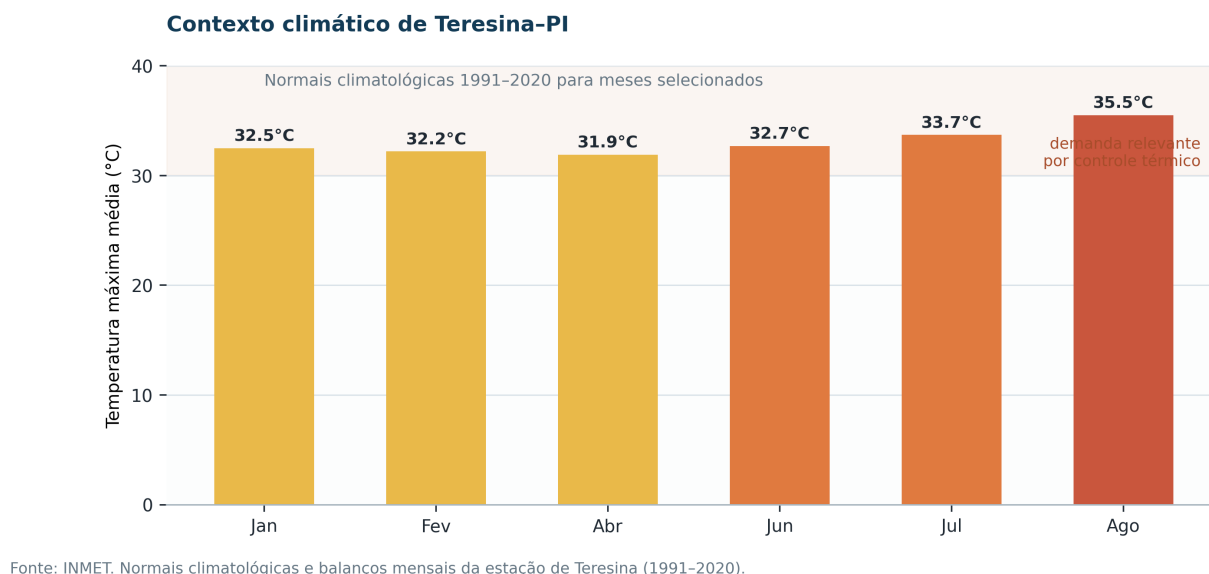
A ABNT NBR 15575 estabelece critérios de desempenho para edificações habitacionais, incluindo requisitos relacionados ao comportamento térmico dos sistemas de vedação. Entretanto, a avaliação de uma parede não pode ser reduzida à condutividade térmica de um único material. A transmitância térmica depende da resistência térmica das diferentes camadas do sistema, enquanto o comportamento global também é influenciado por espessura, pontes térmicas, orientação, condições climáticas e características da envoltória.

Dessa forma, um compósito com baixa condutividade pode contribuir positivamente para o desempenho de uma parede, mas a confirmação de conformidade exige o cálculo ou ensaio do sistema completo segundo o procedimento normativo aplicável. Essa distinção é fundamental para evitar extrapolações indevidas dos resultados de laboratório para uma situação construtiva real.

2.7. Relevância Climática para Teresina-PI

Teresina foi adotada como contexto climático de aplicação em razão de suas elevadas temperaturas ao longo do ano. As normais climatológicas 1991-2020 do INMET registram temperaturas máximas médias de 31,9 °C em abril, 32,7 °C em junho, 33,7 °C em julho e 35,5 °C em agosto. A persistência dessas máximas reforça a relevância de componentes de vedação capazes de reduzir o fluxo de calor através da envoltória. A análise considera a influência da espessura, dos revestimentos e das resistências superficiais, fornecendo uma comparação térmica entre as formulações para condições representativas do clima local (INMET, 2022).

Figura 1. Temperaturas máximas médias climatológicas de Teresina PI em meses selecionados da normal 1991-2020. Os valores caracterizam o contexto climático e não representam resultados do programa experimental.



Fonte: elaboração própria com dados do INMET (2022).

2.8. Desempenho Mecânico e Possibilidade de Aplicação

A resistência à compressão constitui um indicador importante da capacidade de um material cimentício suportar esforços, mas sua interpretação deve considerar a função do componente. Elementos estruturais, elementos de vedação, revestimentos e componentes de preenchimento possuem requisitos diferentes. Para um compósito destinado à vedação, além da resistência, devem ser avaliados estabilidade dimensional, absorção de água, durabilidade, aderência dos revestimentos, comportamento acústico e interação com os demais componentes do sistema.

Nesse sentido, a identificação de um traço intermediário como potencialmente mais equilibrado não significa que ele seja automaticamente adequado para qualquer aplicação. A seleção da

composição deve ser orientada pela função do produto, pelas condições de exposição e pelos requisitos normativos específicos.

2.9. Fundamentação para a Seleção do T30

A escolha do T30 como composição de interesse decorre do comportamento intermediário observado no conjunto de dados. Enquanto o T15 apresenta menor redução de densidade e de condutividade, o T45 produz ganhos térmicos mais intensos acompanhados por perda muito elevada de resistência. O T30 ocupa uma posição intermediária entre esses extremos, apresentando redução expressiva da massa específica e da condutividade sem atingir a queda mecânica observada no T45. Essa seleção representa um compromisso interno entre as propriedades medidas, e não uma otimização universal (LI et al., 2025).

2.10. Estratégia Multiescala de Caracterização

A interpretação de compósitos com EPS deve combinar escalas complementares. Na macroescala, densidade, absorção, resistência, rigidez e condutividade térmica quantificam o desempenho. Na mesoescala, estereomicroscopia e análise digital de imagens verificam distribuição e segregação das pérolas. Na microescala, MEV associado a EDS caracteriza morfologia e composição local; DRX e FTIR auxiliam na identificação de fases e ligações; TGA/DSC avalia transformações térmicas; e microtomografia de raios X permite quantificar a rede tridimensional de vazios. Nenhuma técnica, isoladamente, substitui as demais.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Delineamento Experimental

O programa experimental foi organizado em quatro formulações, definidas a partir da substituição volumétrica progressiva da areia por EPS. O traço T0 representa a formulação de referência, sem incorporação de EPS. Os traços T15, T30 e T45 correspondem, respectivamente, a 15%, 30% e 45% de substituição volumétrica. Essa estratégia permite observar a evolução das propriedades ao longo de uma faixa crescente de incorporação da fase leve.

A opção pela substituição volumétrica é particularmente importante porque o EPS possui massa específica muito inferior à da areia. Uma substituição baseada apenas em massa produziria frações volumétricas muito diferentes e dificultaria a interpretação física do efeito do EPS. A abordagem volumétrica permite comparar os traços com base na parcela de volume de agregado mineral efetivamente substituída.

3.2. Materiais

Foi considerado Cimento Portland CP V-ARI, com massa específica de $3,12 \text{ g/cm}^3$ e área específica Blaine de $4650 \text{ cm}^2/\text{g}$. O agregado miúdo foi descrito como areia natural quartzosa lavada, com dimensão máxima característica de 2,36 mm, módulo de finura de 2,42 e massa específica de $2,63 \text{ g/cm}^3$. O EPS foi constituído por pérolas esféricas pré-expandidas, com diâmetro entre 2,0 e 4,0 mm e massa específica aparente de aproximadamente 25 kg/m^3 . Também foi empregado aditivo plastificante/incorporador de ar à base de lignossulfonato.

3.3. Dosagem dos Compósitos

O traço de referência T0 foi definido na proporção 1:3 (cimento:areia), em massa, com relação água/cimento igual a 0,48. A partir dessa

composição, a areia foi progressivamente substituída por EPS em base volumétrica. As quantidades de cimento, areia, EPS, água e aditivo utilizadas em cada formulação são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Dosagem das formulações avaliadas.

Traço	EPS (%)	Cimento (kg/m ³)	Areia (kg/m ³)	EPS (kg/m ³)	Água (L/m ³)
T0	0	512,0	1536,0	0,0	245,1
T15	15	485,0	1236,8	3,5	232,1
T30	30	458,0	937,5	7,0	219,1
T45	45	431,0	638,3	10,5	206,1

⚠ Esta tabela possui muitas colunas e foi cortada para impressão. Para visualizá-la completa, acesse o artigo original em:

<https://revistatopicos.com.br/artigos/desempenho-termico-e-mecanico-de-compositos-cimenticios-leves-com-eps-para-aplicacao-em-clima-quente?noblockage>

A dosagem apresenta variações coordenadas nos consumos de cimento, areia, EPS, água e aditivo em função do teor de substituição. Essas alterações foram consideradas na interpretação integrada dos resultados, uma vez que o consumo de pasta e a relação entre os constituintes influenciam simultaneamente a porosidade, a resistência mecânica e a condutividade térmica.

3.4. Procedimento de Mistura

O procedimento descrito no estudo utiliza uma etapa inicial de pré-molhagem do EPS com parte da água e do aditivo, seguida de pré-envelopamento das pérolas com cimento. Posteriormente, a areia e a água remanescente são incorporadas e a mistura é

homogeneizada. A sequência busca aumentar a estabilidade das partículas leves e melhorar a distribuição do EPS na matriz.

A etapa de pré-envelopamento possui importância tecnológica porque as pérolas de EPS apresentam tendência à flutuação em misturas com componentes minerais de maior massa específica. Uma distribuição inadequada poderia gerar regiões com excesso de EPS e outras com deficiência da fase leve, aumentando a variabilidade dos resultados e criando planos preferenciais de ruptura.

3.5. Moldagem, Cura e Idade dos Ensaios

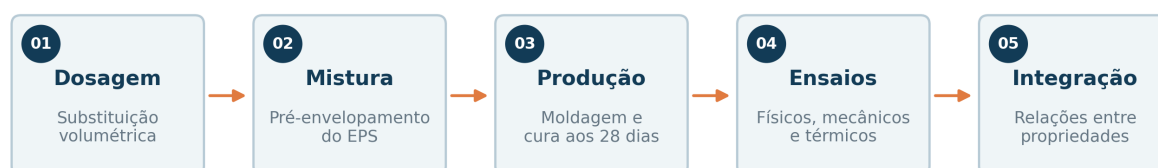
Para cada traço foram moldados três corpos de prova por tipo de ensaio. Na determinação da resistência à compressão utilizaram-se corpos de prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. O concreto foi lançado nos moldes em duas camadas de alturas aproximadamente iguais, submetendo-se cada camada a 12 golpes uniformemente distribuídos com haste metálica. O adensamento foi executado de maneira controlada, com intensidade suficiente para eliminar bolhas de ar de maior dimensão, sem provocar flutuação ou segregação das pérolas de EPS. Após o preenchimento, a superfície foi regularizada e os moldes permaneceram protegidos contra perda de umidade em ambiente de laboratório.

A desmoldagem ocorreu 24 ± 2 h após a moldagem. Em seguida, os espécimes foram submetidos à cura por imersão em água mantida a 23 ± 2 °C até a idade de 28 dias. Por se tratar de cura submersa, a umidade relativa do ar não constituiu variável de controle durante esse período. Na data de ensaio, os corpos de prova foram retirados

do tanque, tiveram o excesso de água superficial removido com tecido absorvente e foram identificados e ensaiados no mesmo dia. Os resultados de cada formulação correspondem à média dos três espécimes.

Os ensaios de compressão foram realizados aos 28 dias, conforme a ABNT NBR 5739. Para as determinações de absorção de água, índice de vazios e massa específica, foram utilizados três espécimes de cada traço, preparados e acondicionados de acordo com a ABNT NBR 9778. A condutividade térmica foi determinada em placas moldadas nas dimensões correspondentes à área útil do equipamento de placa quente protegida, respeitando-se a espessura e o condicionamento especificados no procedimento instrumental. Todos os valores empregados na análise correspondem à idade de 28 dias. A simulação térmica não envolveu novos corpos de prova: utilizou as condutividades medidas nessa idade como dados de entrada, sob as condições de contorno descritas na Seção 3.9.

Figura 2. Fluxo do programa experimental reconstruído.



Fonte: elaboração própria com base no manuscrito.

3.6. Caracterização Física

A densidade no estado endurecido e a porosidade aberta foram utilizadas para avaliar as modificações estruturais decorrentes da

incorporação de EPS. A densidade constitui indicador direto do efeito da fase leve sobre a massa específica do compósito, enquanto a porosidade fornece informação complementar sobre a quantidade de vazios acessíveis e sobre a alteração da estrutura interna.

3.7. Caracterização Mecânica

A resistência à compressão axial foi utilizada para avaliar a capacidade resistente do compósito. O módulo de elasticidade dinâmico foi empregado como indicador da rigidez global do material. A análise conjunta dessas duas propriedades é importante porque materiais leves podem apresentar redução de resistência e, simultaneamente, redução significativa da rigidez, refletindo a maior deformabilidade do sistema.

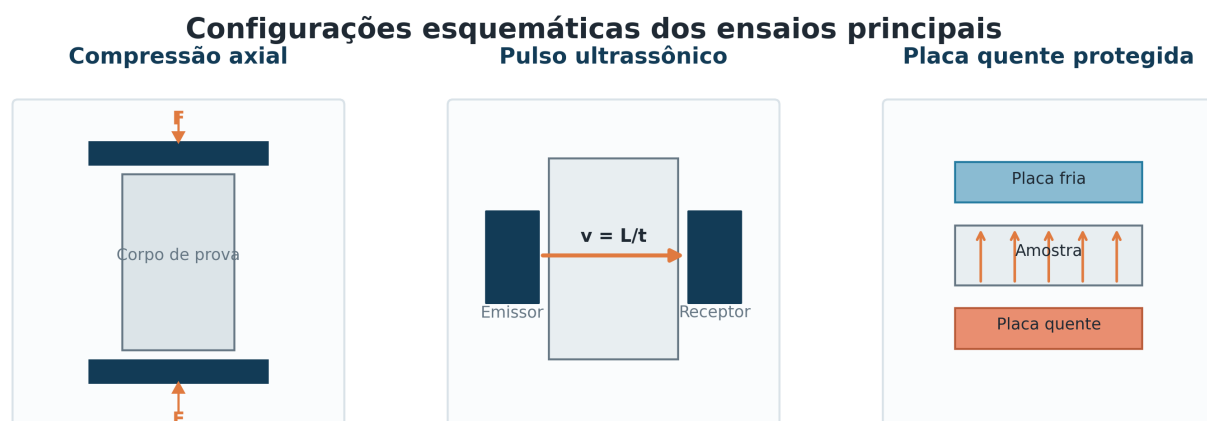
3.8. Caracterização Térmica

A condutividade térmica foi determinada por método de placa quente protegida, conforme a descrição do estudo. Essa propriedade representa a capacidade do material de conduzir calor em regime de transferência predominantemente condutiva. A interpretação dos resultados deve considerar as condições de umidade e temperatura nas quais os ensaios foram realizados.

3.9. Documentação e Controle dos Ensaios

A documentação dos ensaios foi organizada pela identificação do traço e do corpo de prova, idade, condição de umidade, geometria, equipamento, regime de carregamento, repetição e critério de cálculo. Esses parâmetros asseguram a correspondência entre cada resultado e sua respectiva condição experimental, além de favorecerem a reprodutibilidade do programa de ensaios.

Figura 3. Arranjos esquemáticos dos ensaios de compressão, velocidade de pulso ultrassônico e condutividade térmica. Os desenhos explicam o método e não constituem fotografias dos ensaios.



Fonte: elaboração própria.

Tabela 2. Relação entre propriedade, método, saída primária e evidência exigida.

Propriedade/ técnica	Método recomendado	Saída primária	Parâmetros de controle e registro
Massa específica e porosidade	ABNT NBR 9778 ou procedimento equivalente	ρ , absorção e índice de vazios	Massas seca/saturada/imersa, dimensões, planilha e fotos identificadas
Compressão axial	ABNT NBR 5739	Curva força- tempo e f_c	Arquivo da prensa, área medida, modo de ruptura e certificado de calibração
Módulo dinâmico / ultrassom	ASTM C597 e relação declarada	Tempo de trânsito, velocidade e E_d calculado	Traçado do pulso, distância, frequência, acoplamento e equação usada

Condutividade e térmica	ISO 8302, placa quente protegida	Fluxo, ΔT , espessura e λ	Série temporal até regime estacionário, umidade e calibração
MEV/EDS	Protocolo instrumental declarado	Micrografia e espectro local	Arquivo original, escala, tensão, detector, recobrimento e código da amostra
DRX / FTIR / TGA	Protocolos instrumentais declarados	Difratograma, espectro e termograma	Arquivos brutos, branco/padrão, faixa, passo e atmosfera

3.10. Tratamento Estatístico e Integridade dos Dados

Os valores médios e as medidas de dispersão correspondem a três espécimes por traço. As barras de erro representam a variabilidade experimental de cada propriedade e permitem comparar a estabilidade das respostas entre as formulações. A análise estatística foi concentrada em medidas descritivas, variações relativas e associações entre propriedades, em conformidade com o delineamento adotado.

3.11. Tratamento e Integração dos Resultados

Os resultados foram organizados a partir das médias e medidas de dispersão de três espécimes por traço. As formulações foram comparadas entre si e as variações relativas foram calculadas em relação ao T0, permitindo integrar massa específica, porosidade, resistência à compressão, módulo dinâmico e condutividade térmica em uma leitura conjunta do desempenho.

A interpretação priorizou a magnitude, a direção e a coerência física das variações observadas. As medidas de dispersão foram mantidas nos gráficos para representar a variabilidade experimental, enquanto os indicadores relativos foram empregados para comparar o desempenho termo-mecânico das composições sob um mesmo critério.

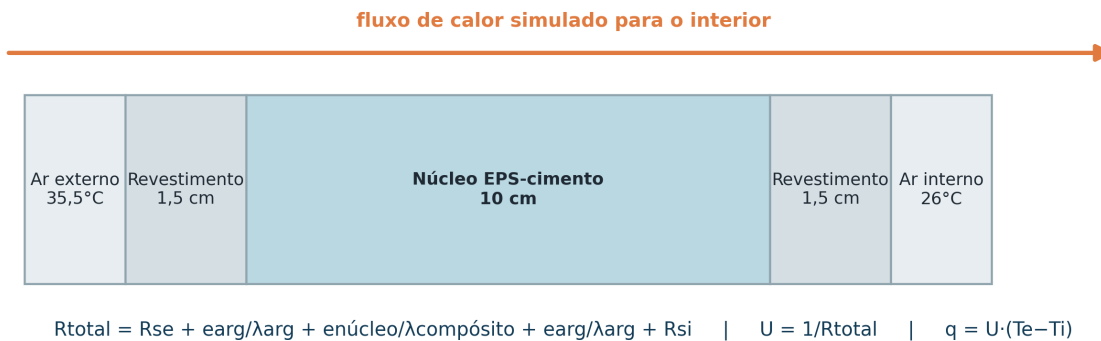
3.12. Simulação Paramétrica para Teresina-PI

A análise numérica seguiu o método de resistências térmicas em série para camadas homogêneas, compatível com o escopo da ISO 6946. Adotou-se parede composta por revestimento externo de 1,5 cm, núcleo cimentício com EPS e revestimento interno de 1,5 cm. Para os revestimentos foi assumida $\lambda = 1,15 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. As resistências superficiais adotadas foram $R_{se} = 0,04$ e $R_{si} = 0,13 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$. Foram avaliadas espessuras de núcleo de 8, 10, 12 e 15 cm.

A resistência e a transmitância foram calculadas por $R_{total} = R_{se} + \sum(e_i/\lambda_i) + R_{si}$ e $U = 1/R_{total}$. Para os meses selecionados, o fluxo térmico estacionário voltado ao interior foi estimado por $q = U(T_e - T_i)$, considerando $T_i = 26 \text{ }^\circ\text{C}$ e as temperaturas máximas médias climatológicas do INMET. O modelo é unidimensional e não inclui radiação solar incidente, capacidade térmica, pontes térmicas, infiltração, umidade, variação horária ou consumo de climatização; portanto, seus resultados representam comparação paramétrica, não previsão energética anual.

Figura 4. Modelo multicamada e equações empregados na simulação paramétrica.

Modelo de parede multicamada adotado na simulação



Fonte: elaboração própria.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

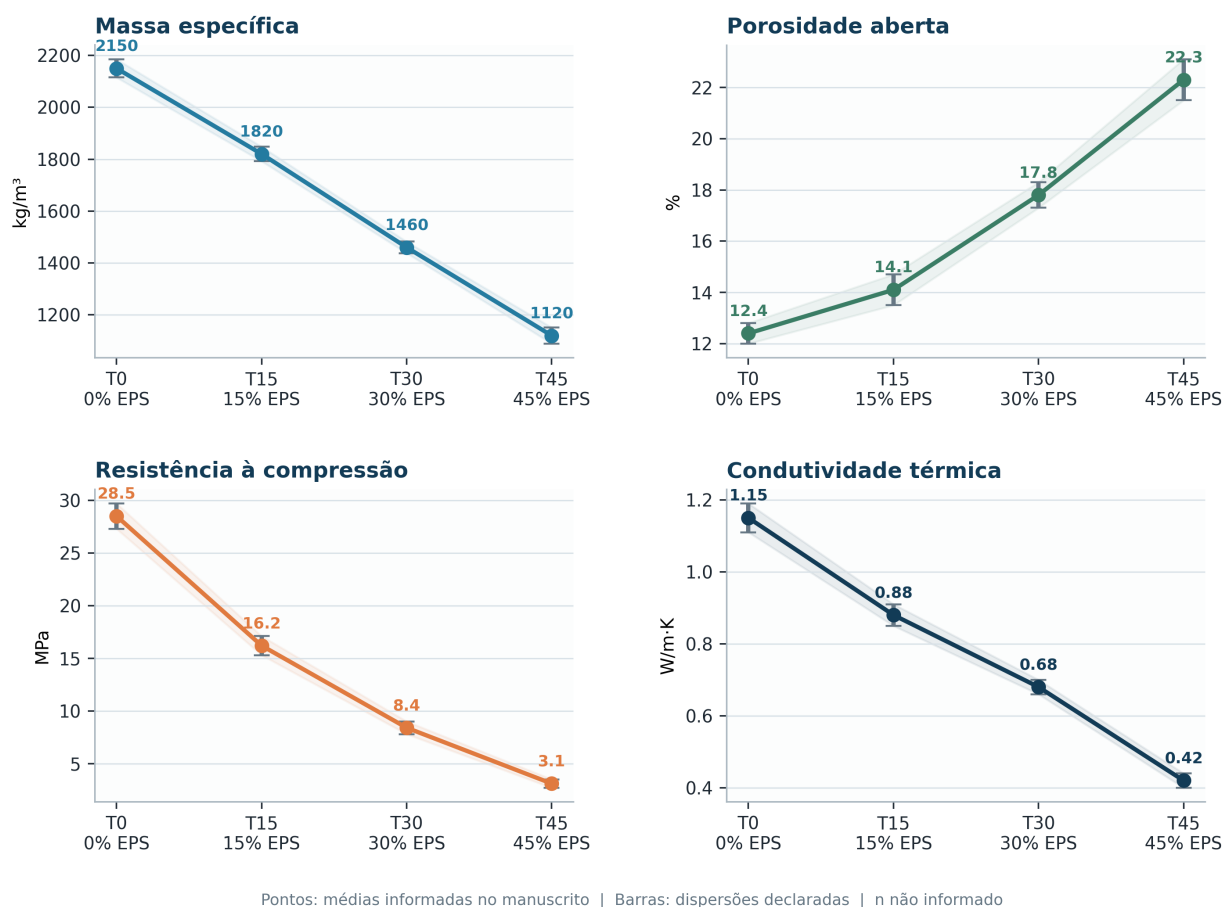
4.1. Efeito do Teor de EPS Sobre a Densidade

Os resultados mostram uma redução contínua da densidade com o aumento da substituição de areia por EPS. O traço T0 apresentou 2150 kg/m³, enquanto T15, T30 e T45 apresentaram 1820, 1460 e 1120 kg/m³, respectivamente. Em comparação com a referência, essas mudanças correspondem a reduções aproximadas de 15,3%, 32,1% e 47,9%.

A tendência confirma o efeito esperado da incorporação de uma fase de massa específica muito inferior à dos agregados minerais. O resultado possui relevância prática porque a redução da massa específica pode diminuir o peso próprio de elementos de vedação e facilitar transporte e manuseio. Entretanto, a mesma alteração que reduz a massa também modifica a capacidade de transferência de tensões e a estrutura interna do compósito.

Figura 5. Evolução das propriedades selecionadas. Pontos: médias de três espécimes por traço; barras: dispersão experimental.

Efeito do teor de EPS nas propriedades do compósito



Fonte: elaboração própria a partir dos resultados obtidos.

4.2. Porosidade e Organização Interna

A porosidade aberta aumentou de 12,4% no T0 para 14,1% no T15, 17,8% no T30 e 22,3% no T45. O crescimento é coerente com a substituição progressiva de uma fase mineral contínua por inclusões poliméricas e com a formação de regiões interfaciais mais porosas.

A relação entre porosidade e densidade é particularmente evidente no conjunto analisado: os traços mais leves são também aqueles que apresentam maior porosidade aberta. Essa combinação contribui para reduzir a capacidade resistente, pois diminui a área efetiva de material sólido capaz de transmitir tensões. Ao mesmo tempo, a maior quantidade de vazios participa do mecanismo de redução da transferência de calor.

4.3. Resistência à Compressão

A resistência à compressão diminuiu de 28,5 MPa no T0 para 16,2 MPa no T15, 8,4 MPa no T30 e 3,1 MPa no T45. Em termos relativos, as reduções em relação ao traço de referência são aproximadamente 43,2%, 70,5% e 89,1%, respectivamente. A tendência é clara e indica forte sensibilidade da resistência ao aumento da fração de EPS.

A perda de resistência não deve ser atribuída a um único mecanismo. Ela resulta da combinação entre menor fração de agregado mineral rígido, maior quantidade de vazios, presença de uma fase polimérica deformável e menor eficiência da interface EPS-pasta. À medida que o teor de EPS aumenta, cresce também a quantidade de regiões nas quais a transferência de tensões é menos eficiente.

O T45 merece atenção especial porque apresenta resistência de 3,1 MPa, muito próxima do patamar de 3,0 MPa utilizado como referência para determinada classe de blocos de concreto em versões normativas anteriores. Essa proximidade, contudo, não deve ser interpretada como comprovação de conformidade normativa do compósito, pois requisitos de produto incluem características geométricas, dimensionais, absorção, controle tecnológico e demais condições previstas na norma específica.

4.4. Módulo de Elasticidade Dinâmico

O módulo dinâmico reduziu de 29,2 GPa no T0 para 18,4 GPa no T15, 11,1 GPa no T30 e 5,2 GPa no T45. A redução acompanha a tendência da resistência e evidencia o efeito da incorporação de uma fase de baixa rigidez.

O comportamento é importante para aplicações em sistemas de vedação porque a menor rigidez pode alterar a resposta do elemento diante de deformações da estrutura, movimentações higrotérmicas e ações acidentais. Um material mais deformável pode apresentar vantagens em determinadas situações, mas também exige avaliação da compatibilidade com revestimentos, juntas e elementos estruturais adjacentes.

4.5. Condutividade Térmica

Em contraste com as propriedades mecânicas, a condutividade térmica diminuiu de 1,15 W/m·K no T0 para 0,88 W/m·K no T15, 0,68 W/m·K no T30 e 0,42 W/m·K no T45. As reduções relativas correspondem a aproximadamente 23,5%, 40,9% e 63,5%.

A tendência demonstra que o aumento do teor de EPS promove ganho térmico consistente no conjunto estudado. O mecanismo pode ser associado à menor condutividade da fase polimérica, à presença de ar em sua estrutura celular e ao aumento da porosidade. O resultado é particularmente relevante para componentes de vedação, nos quais o controle do fluxo de calor constitui um dos fatores que influenciam o desempenho ambiental da edificação.

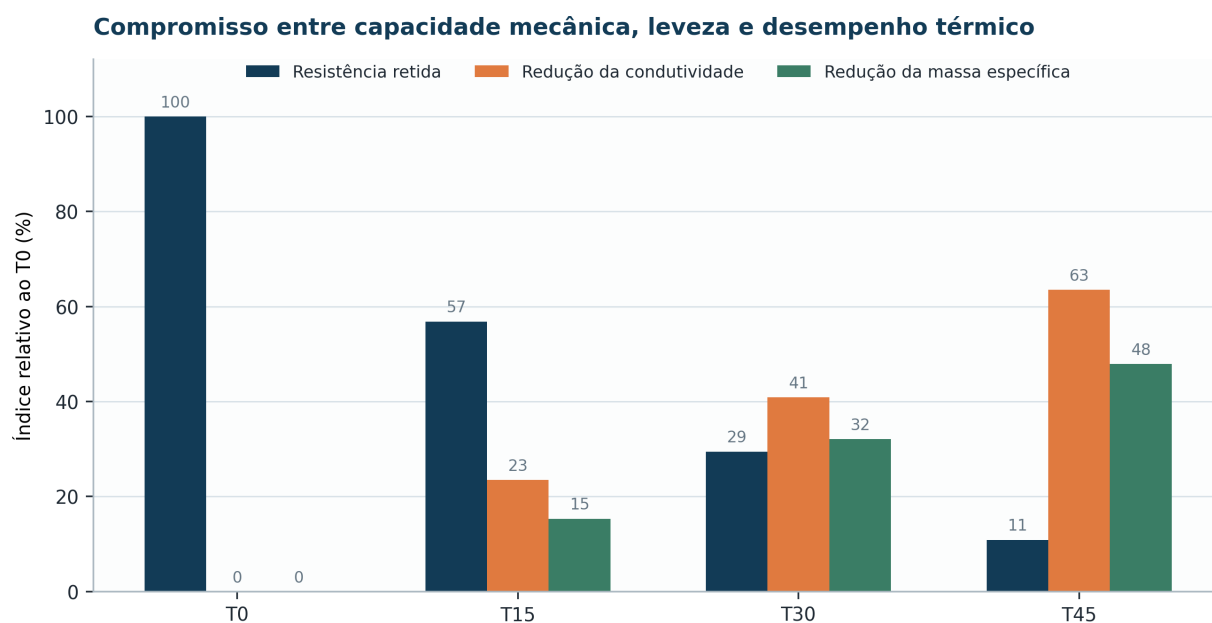
É importante, porém, distinguir condutividade térmica de transmitância térmica. A primeira é propriedade do material; a segunda depende da resistência térmica total do elemento construtivo. Portanto, valores de condutividade obtidos para o compósito não devem ser apresentados isoladamente como comprovação de atendimento aos requisitos da ABNT NBR 15575.

4.6. Relação Integrada Entre Propriedades

A principal contribuição dos resultados está na identificação de um comportamento de compromisso. O aumento do EPS melhora simultaneamente a leveza e o desempenho térmico, mas reduz resistência e rigidez. Esse antagonismo é típico de materiais nos quais uma fase leve e pouco condutora substitui uma fase mineral mais densa e resistente.

O T15 apresenta uma redução relativamente moderada da densidade e da condutividade, mantendo resistência significativamente superior à do T30 e do T45. Já o T45 maximiza a redução da densidade e da condutividade, porém apresenta perda mecânica muito elevada. O T30 ocupa uma posição intermediária e, por isso, apresenta interesse tecnológico para uma solução que não priorize exclusivamente uma única propriedade.

Figura 6. Índices relativos ao traço de referência. “Resistência retida” é $f_c/f_{c,T0}$; os demais índices representam reduções em relação ao T0.

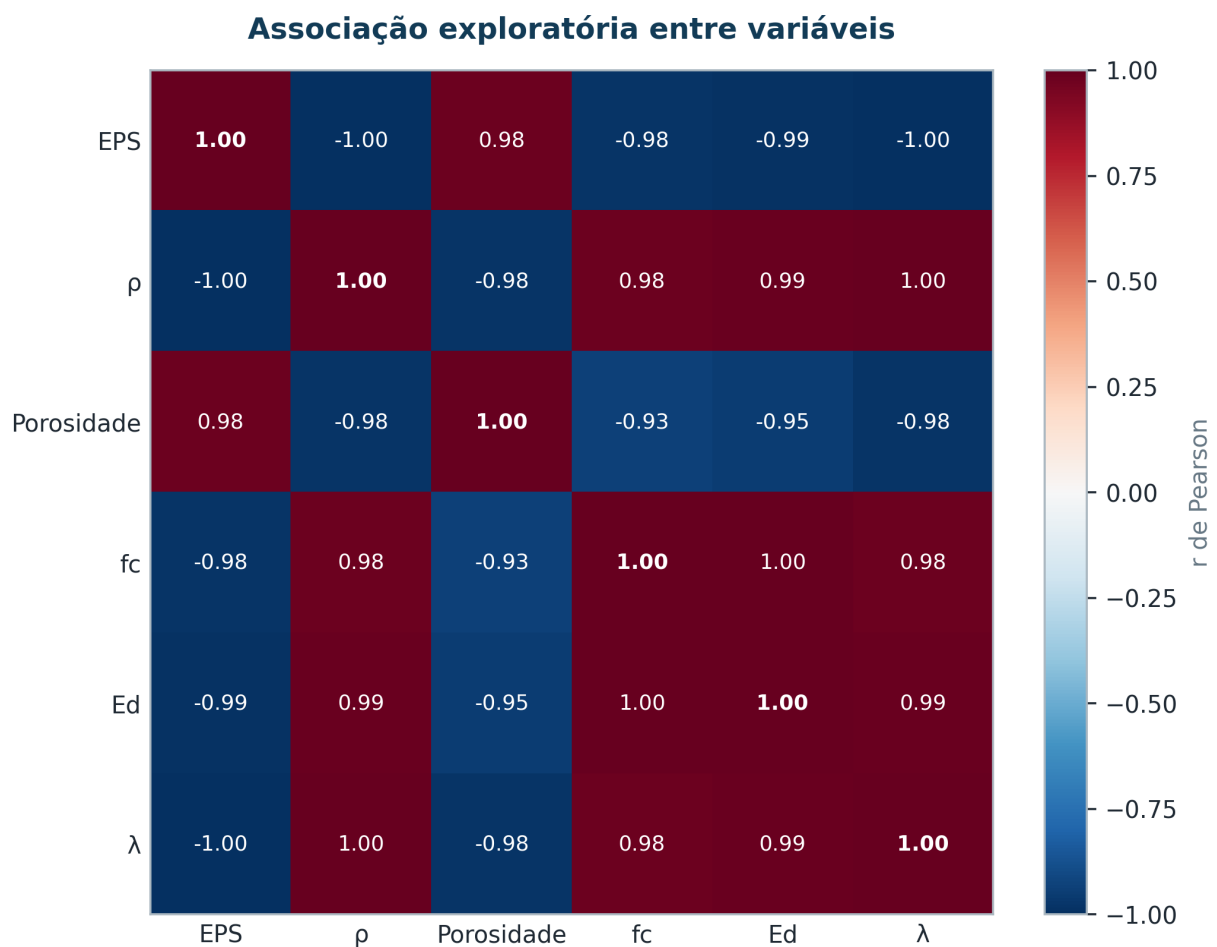


Fonte: cálculo a partir dos dados fornecidos.

4.7. Associação Exploratória Entre Variáveis

A matriz de correlação indica associações muito fortes no conjunto de quatro formulações: o teor de EPS cresce com a porosidade e decresce com massa específica, resistência, módulo e condutividade. Essa leitura é exploratória, pois apenas quatro níveis de dosagem geram coeficientes instáveis e não permitem inferir causalidade ou significância. Ainda assim, a coerência dos sinais sustenta o mecanismo físico discutido: aumento da fase leve e dos vazios, melhoria térmica e perda de continuidade resistente.

Figura 7. Matriz de correlação de Pearson calculada com as quatro médias por traço. Uso exclusivamente exploratório; $n = 4$ formulações.



Coefficientes calculados com apenas quatro formulações; não representam inferência estatística.

4.8. Interpretação dos Mecanismos com Base na Literatura

A redução de resistência e de módulo é compatível com a substituição de partículas minerais rígidas por inclusões poliméricas deformáveis, com o aumento da porosidade e com a menor eficiência de transferência de tensões na interface. Essas explicações constituem interpretação mecanística apoiada na literatura sobre concretos leves com EPS; não representam observações de MEV, EDS, DRX ou microtomografia realizadas neste trabalho.

4.9. Rotas de Caracterização Microestrutural

A caracterização do compósito pode ser aprofundada por técnicas complementares capazes de relacionar composição, estrutura de poros e características da interface EPS-pasta. A Tabela a seguir sistematiza as contribuições específicas de cada técnica para o avanço da interpretação microestrutural.

Técnica proposta	Pergunta científica	Como confirmaria ou refutaria a interpretação
MEV-EDS	A região indicada possui composição compatível com produtos hidratados?	Mapeia Ca, Si, Al e S; reduz o risco de identificar fases apenas pela forma.
DRX com refinamento	Quais fases cristalinas estão presentes e em que proporção?	Confirma fases cristalinas; não quantifica diretamente fases amorfas sem estratégia apropriada.
FTIR	Há bandas associadas a hidratos, carbonatos e grupos do polímero?	Corroborar alterações químicas e possível interação superficial.
TGA/DTG	Quais perdas de massa e eventos de decomposição ocorrem?	Ajuda a estimar água ligada, portlandita, carbonatos e fração orgânica, com modelo declarado.

Micro-CT	Como vazios e EPS se distribuem tridimensionalmente?	Quantifica volume, conectividade, tamanho de poros e segregação sem destruir a amostra.
Análise digital de imagens	Qual é a fração areal e a uniformidade das inclusões?	Produz métricas replicáveis de dispersão, circularidade e distância entre partículas.

4.10. Integração dos Resultados

Elemento analisado	Base de análise	Contribuição científica
Médias de ρ , porosidade, f_c , E_d e λ	Médias e dispersões experimentais; três espécimes por traço	Comparação integrada entre propriedades e formulações
Gráficos e índices	Cálculos realizados a partir das médias experimentais	Visualização das tendências e seleção multicritério

4.11. Discussão Específica do T30

O T30 apresenta 1460 kg/m^3 de densidade, 17,8% de porosidade aberta, 8,4 MPa de resistência à compressão, 11,1 GPa de módulo dinâmico e $0,68 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ de condutividade térmica. Esses valores colocam o traço em uma posição intermediária entre as formulações estudadas e tornam sua análise particularmente relevante.

Em relação ao T0, a densidade é reduzida em aproximadamente um terço, enquanto a condutividade térmica cai em cerca de 41%. Ao mesmo tempo, embora a resistência seja reduzida em aproximadamente 71%, o valor absoluto de 8,4 MPa permanece superior ao obtido no T45. Portanto, a escolha do T30 não representa

maximização de uma propriedade isolada, mas uma estratégia de compromisso entre requisitos potencialmente conflitantes.

Para uma aplicação prática, essa composição deveria ser submetida a uma etapa adicional de validação. Seria necessário avaliar absorção de água, estabilidade dimensional, aderência de revestimentos, resistência à tração na flexão, comportamento frente a ciclos higrotérmicos, durabilidade e desempenho do sistema de parede em escala real. Somente após essa etapa seria possível afirmar com segurança a adequação do material a uma aplicação específica.

4.12. Implicações para Aplicação em Vedações

Os resultados sugerem potencial para utilização de compósitos com EPS em elementos de vedação nos quais a redução do peso próprio e da condutividade térmica seja relevante. A aplicação, entretanto, deve considerar que o elemento não atua isoladamente: espessura, juntas, revestimentos, interfaces com pilares e vigas, aberturas, fixações, orientação solar e regime de ventilação interferem no desempenho. Em Teresina, a justificativa climática fortalece a pertinência da investigação, mas a validação requer cálculo higrotérmico ou ensaio do sistema de parede completo sob condições representativas.

A análise normativa deve, portanto, ser conduzida em nível de sistema. A ABNT NBR 15575 fornece uma estrutura de avaliação de desempenho para edificações habitacionais, mas não transforma automaticamente uma propriedade de laboratório em comprovação de desempenho da parede. O correto é utilizar as propriedades obtidas como dados de entrada para avaliação do sistema construtivo correspondente.

4.13. Perspectivas de Aprofundamento

O programa experimental, composto por três espécimes por traço, permitiu identificar tendências consistentes entre o teor de EPS e as propriedades físicas, mecânicas e térmicas. A integração das médias, medidas de dispersão e variações relativas forneceu uma base comparativa para selecionar a composição de melhor equilíbrio. O aprofundamento estatístico em conjuntos amostrais ampliados poderá complementar essa análise e estimar com maior resolução a variabilidade associada a cada formulação.

A caracterização microestrutural constitui uma perspectiva relevante para o aprofundamento dos mecanismos associados à incorporação de EPS na matriz cimentícia. Análises por MEV/EDS podem esclarecer a morfologia e a composição da zona de transição interfacial, enquanto DRX, FTIR e análises térmicas podem contribuir para a identificação das fases formadas e de possíveis alterações nos produtos de hidratação. A microtomografia de raios X também pode auxiliar na avaliação tridimensional da distribuição das partículas de EPS e da conectividade dos vazios. Essas abordagens ampliam a compreensão das relações entre microestrutura, porosidade, resistência mecânica e condutividade térmica.

4.14. Aplicação em Elementos de Vedação

As propriedades determinadas permitem calcular a resistência térmica da camada cimentícia por $R = e/\lambda$ e comparar sua contribuição para sistemas de vedação. A transmitância térmica do conjunto resulta da combinação entre núcleo, revestimentos e resistências superficiais, além da influência de juntas, pontes térmicas, umidade, orientação e clima. Nesse contexto, o T30

apresenta propriedades favoráveis para integração em elementos leves de vedação e fornece parâmetros materiais para a avaliação do sistema segundo a ABNT NBR 15575.

4.15. Comparação com a Literatura Recente

A literatura de 2020 a 2026 converge em um ponto central: o EPS reduz a massa específica e a condutividade térmica, mas introduz um conflito não linear com a resistência e a rigidez. A comparação da Tabela 3 não pretende equiparar diretamente estudos com materiais, granulometrias, teores e métodos de ensaio distintos. Seu objetivo é verificar se a direção das tendências observadas no conjunto T0-T45 é compatível com pesquisas independentes e identificar variáveis que devem ser controladas em estudos futuros.

Tabela 3. Posicionamento dos resultados em relação a estudos recentes sobre compósitos cimentícios com EPS.

Estudo	Sistema analisado	Contribuição principal	Relação com este artigo
Shi et al. (2022)	Concretos com EPS em diferentes densidades e pastas	A densidade exerceu influência mais forte sobre a resistência do que o aumento isolado da resistência da pasta.	Sustenta a leitura conjunta de massa específica, porosidade e resistência.
Prasittisopin et al. (2022)	Revisão de concreto com EPS	Síntese do ganho de leveza e isolamento acompanhado por perdas mecânicas e desafios ambientais.	Confirma o caráter de compromisso entre propriedades.

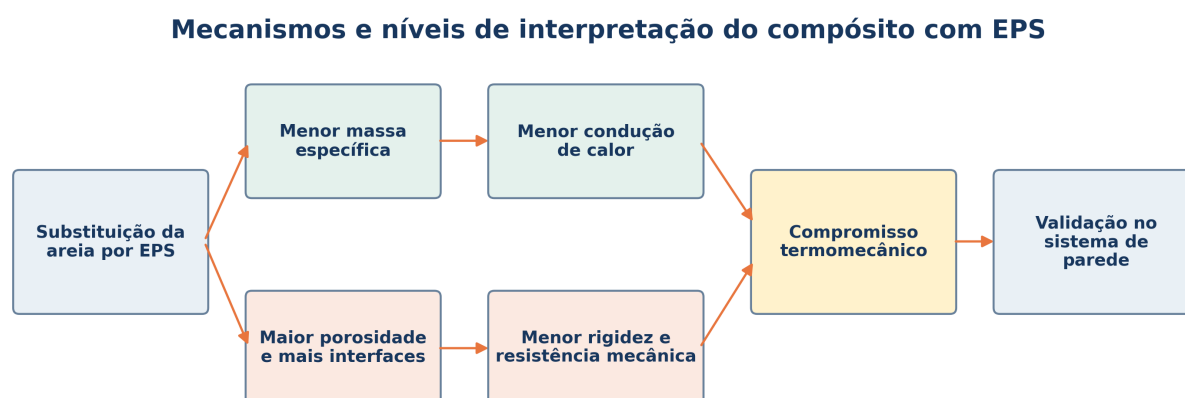
El Gamal et al. (2024)	Concreto leve com pérolas recicladas de EPS	Reduções de densidade e condutividade ocorreram junto à diminuição das propriedades mecânicas.	Coerente com a tendência monotônica observada entre T0 e T45.
Wei et al. (2025)	Compósitos cimentícios com EPS e prensagem a quente	O processamento foi utilizado para coordenar desempenho mecânico, térmico e acústico.	Indica processamento e interface como rotas de otimização posteriores.
Li et al. (2025)	Otimização multiobjetivo de concreto leve com EPS	Demonstrou conflito não linear entre resistência, condutividade e custo.	Apoia o uso de análise multicritério, sem reduzir a decisão a uma única propriedade.
Presente análise	Substituição volumétrica de areia por 0-45% de EPS	Aumento de porosidade e reduções simultâneas de densidade, resistência, rigidez e condutividade.	T30 representa compromisso interno; T45 maximiza o ganho térmico, mas cai para 3,1 MPa.

Os resultados também mostram que a comparação por teor nominal de EPS, isoladamente, é insuficiente. Granulometria, densidade aparente das pérolas, método de incorporação, teor de pasta, adições minerais, adensamento e umidade de ensaio podem alterar significativamente o resultado. Por isso, a correspondência com a literatura deve ser entendida como consistência mecanística, não como reprodução numérica.

4.16. Interpretação Multiescala e Sustentabilidade

A incorporação de EPS modifica simultaneamente a composição volumétrica, a rede de vazios e a zona de transição interfacial. A menor participação de partículas minerais rígidas reduz massa e cria caminhos menos condutivos para o calor. Em contrapartida, vazios, segregação e aderência insuficiente diminuem a área efetiva de transferência de tensões. A Figura 7 organiza essa cadeia causal e separa a evidência medida no material da validação necessária no componente de vedação.

Figura 8. Síntese conceitual dos mecanismos associados à incorporação de EPS e dos níveis necessários para validação.



As relações representam mecanismos fundamentados na literatura; a conformidade deve ser verificada no produto e no sistema construtivo.

Fonte: elaboração própria com base em Shi et al. (2022), Prasittisopin et al. (2022), El Gamal et al. (2024), Wei et al. (2025) e Li et al. (2025).

Do ponto de vista ambiental, o uso de EPS pós-consumo pode desviar um resíduo volumoso de rotas inadequadas de descarte e reduzir a demanda por agregado mineral. Entretanto, o benefício não deve ser presumido apenas pela presença do polímero. Transporte, limpeza, trituração, perdas, teor de cimento, durabilidade, possibilidade de reciclagem do compósito e comportamento ao fogo influenciam o balanço ambiental. Uma avaliação de ciclo de vida exigiria inventário específico e encontra-se fora do escopo dos dados disponíveis.

4.17. Simulação de Resistência e Transmitância Térmica

A resistência térmica de camadas homogêneas foi calculada pela relação $R = e/\lambda$, em que e representa a espessura e λ a condutividade térmica determinada experimentalmente. Foram avaliadas espessuras de 8, 10, 12 e 15 cm, permitindo quantificar a influência conjunta da formulação e da geometria sobre a transferência de calor.

Tabela 4. Resistência térmica calculada para camadas homogêneas a partir das condutividades experimentais, em $\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$.

Traço	λ W/m-K	R 8 cm	R 10 cm	R 12 cm	R 15 cm
T0	1,15	0,070	0,087	0,104	0,130
T15	0,88	0,091	0,114	0,136	0,170
T30	0,68	0,118	0,147	0,176	0,221
T45	0,42	0,190	0,238	0,286	0,357

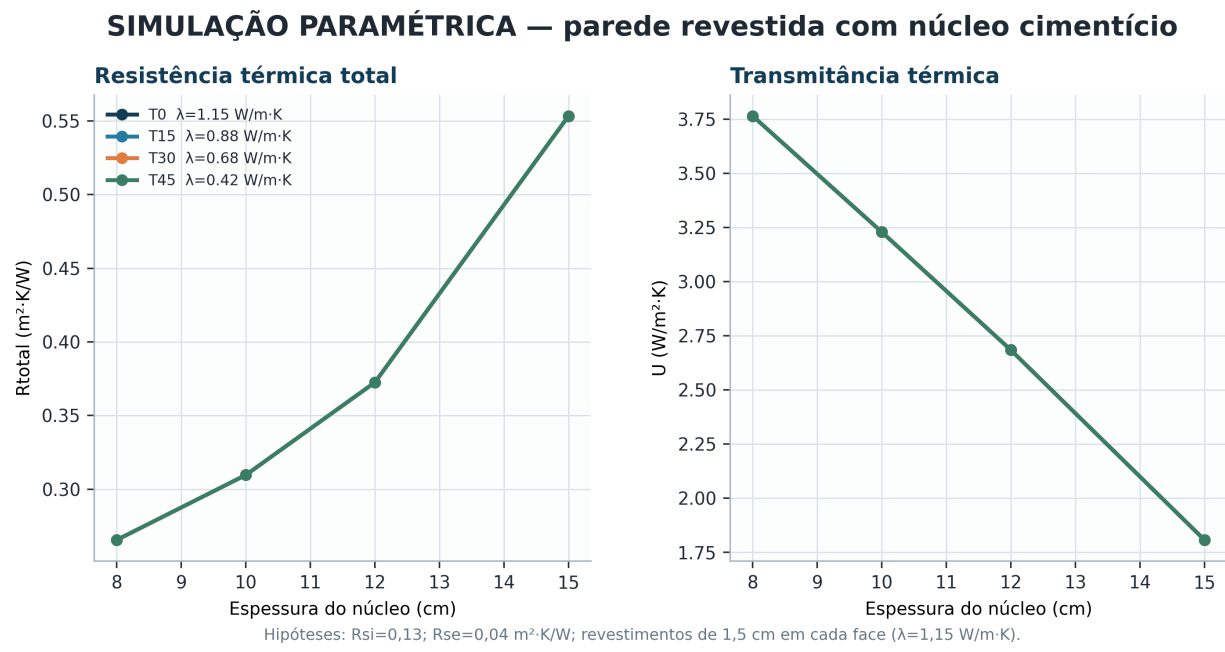
⚠ Esta tabela possui muitas colunas e foi cortada para impressão. Para visualizá-la completa, acesse o artigo original em:

<https://revistatopicos.com.br/artigos/desempenho-termico-e-mecanico-de-compositos-cimenticios-leves-com-eps-para-aplicacao-em-clima-quente?noblockage>

Na espessura de 10 cm, a resistência térmica da camada aumentaria de $0,087 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ no T0 para $0,147 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ no T30 e $0,238 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ no T45. O ganho relativo é relevante para um clima quente como o de Teresina, mas esses valores não representam a resistência térmica total de uma parede. Revestimentos, câmaras de ar, resistências superficiais, juntas, pontes térmicas e estado de umidade devem ser

incluídos conforme a ABNT NBR 15220-2 e o procedimento de avaliação adotado para a ABNT NBR 15575.

Figura 9. Resistência e transmitância térmicas para diferentes espessuras do núcleo no modelo paramétrico.



Fonte: elaboração própria.

4.18. Índice Descritivo e Decisão Multicritério

Foi calculado um índice descritivo de compromisso termo-mecânico, $ITM = (\Delta\lambda + \Delta\rho)/\Delta f_c$, no qual $\Delta\lambda$ e $\Delta\rho$ representam as reduções percentuais de condutividade térmica e massa específica em relação ao T0, enquanto Δf_c corresponde à redução percentual de resistência. O índice foi desenvolvido para comparar as formulações sob um critério comum e expressa o ganho combinado de leveza e resposta térmica por unidade de variação mecânica no conjunto estudado.

Tabela 5. Índice descritivo de compromisso e verificação do limite analítico de resistência.

Traço	Redução ρ %	Redução λ %	Perda f_c %	ITM	$f_c \geq 5$ h
T0	referência	referência	referência	-	Sim
T15	15,3	23,5	43,2	0,90	Sim
T30	32,1	40,9	70,5	1,03	Sim

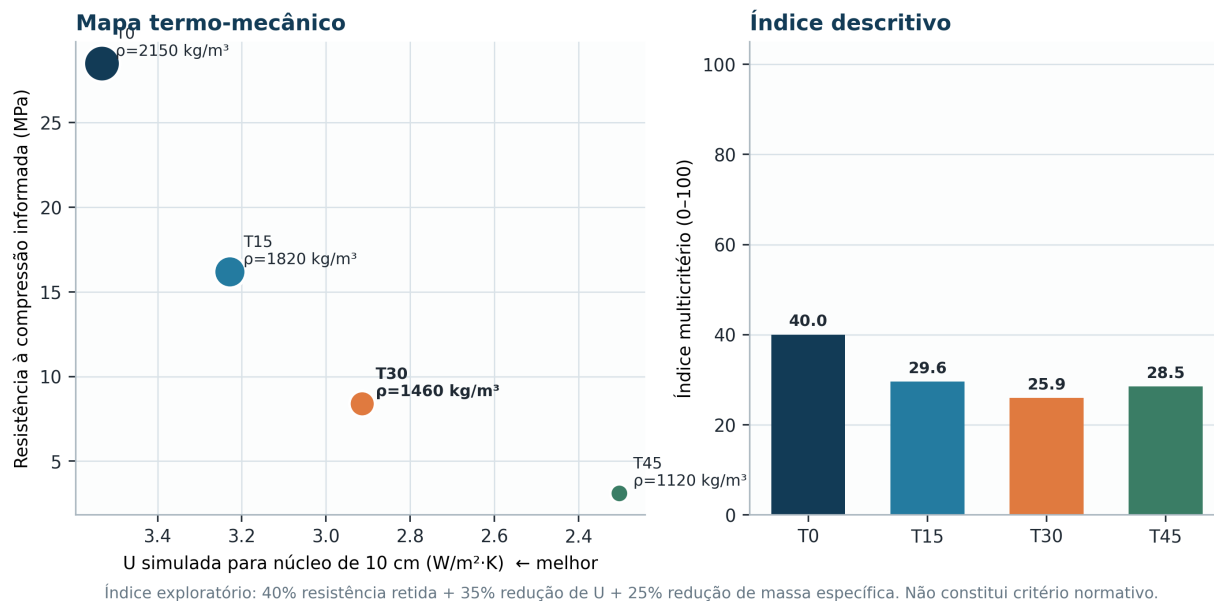
⚠ Esta tabela possui muitas colunas e foi cortada para impressão. Para visualizá-la completa, acesse o artigo original em:

<https://revistatopicos.com.br/artigos/desempenho-termico-e-mecanico-de-compositos-cimenticios-leves-com-eps-para-aplicacao-em-clima-quente?noblockage>

O T45 apresentou o maior ITM, porém sua resistência de 3,1 MPa ficou abaixo do patamar comparativo de 5 MPa adotado na análise. Entre as formulações modificadas que permaneceram acima desse valor, o T30 apresentou ITM superior ao T15, maior resistência térmica e redução mais intensa de massa específica. O conjunto desses indicadores caracteriza o T30 como a composição de melhor equilíbrio termo-mecânico entre os traços avaliados.

Figura 10. Mapa termo-mecânico e índice multicritério exploratório. O tamanho dos marcadores representa a massa específica.

SIMULAÇÃO E DECISÃO — compromisso entre desempenho e leveza



Fonte: elaboração própria.

4.19. Implicações Específicas para Teresina

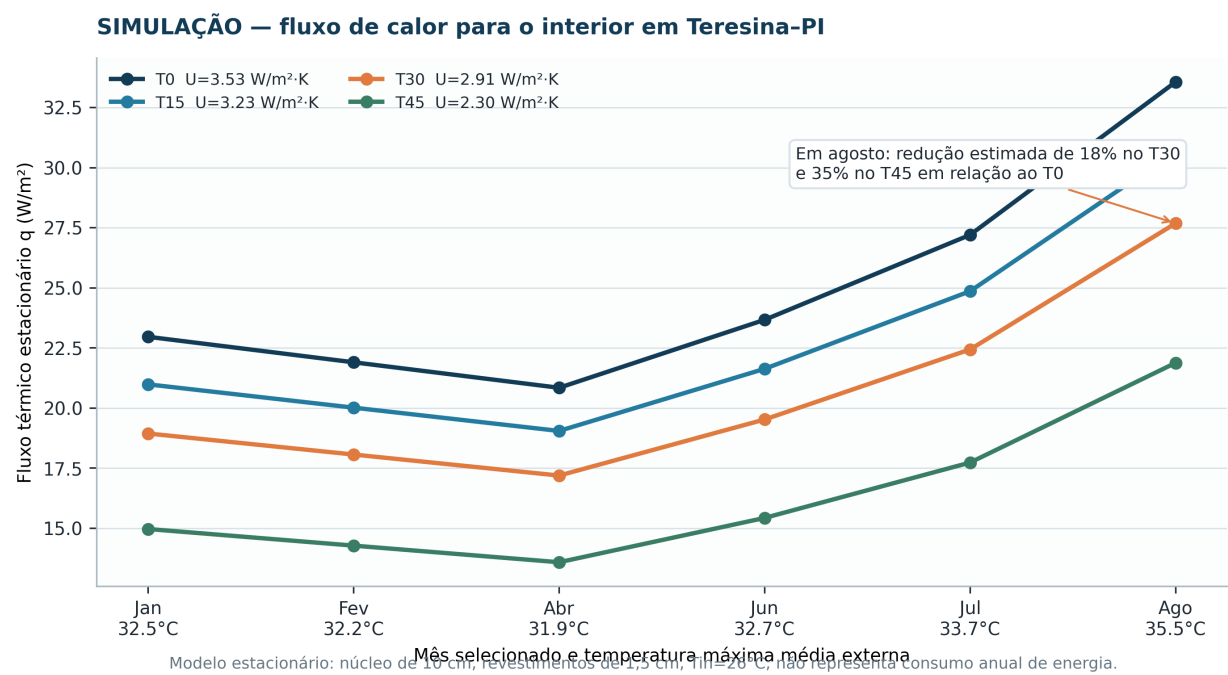
As temperaturas máximas médias climatológicas de Teresina tornam pertinente o desenvolvimento de soluções de envoltória capazes de reduzir ganhos de calor. A análise estacionária quantifica o efeito da condutividade e da espessura sobre o fluxo térmico, enquanto variáveis como orientação solar, absorvância externa, ventilação, ocupação e cargas internas definem o comportamento dinâmico do edifício. Dessa forma, o contexto climático de Teresina amplia a relevância aplicada dos resultados e estabelece parâmetros para avaliações subsequentes em escala de sistema.

4.20. Fluxo Térmico Estacionário nos Cenários Climáticos de Teresina

A aplicação das temperaturas máximas médias climatológicas ao modelo de parede mostrou maior fluxo no cenário de agosto. Para núcleo de 10 cm, q foi estimado em $33,6 \text{ W/m}^2$ no T0, $31,0 \text{ W/m}^2$ no T15, $27,7 \text{ W/m}^2$ no T30 e $21,9 \text{ W/m}^2$ no T45. Assim, as reduções calculadas em relação ao T0 foram de 7,7%, 17,5% e 34,8%,

respectivamente. O resultado evidencia o benefício térmico potencial do EPS, mas não permite estimar diretamente temperatura interna, horas de desconforto ou economia de energia.

Figura 11. Fluxo térmico estacionário obtido pelo modelo para meses selecionados de Teresina-PI. Temperaturas externas: INMET; $T_i = 26^{\circ}\text{C}$; núcleo = 10 cm.



Fonte: elaboração própria.

Tabela 6. Resultados simulados para parede com núcleo de 10 cm no cenário de agosto em Teresina.

Traço	Rtotal (m²·K/W)	U (W/m²·K)	q em agosto (W/m²)	Redução de q vs. T0
T0	0.283	3.53	33.6	0.0%
T15	0.310	3.23	30.7	8.6%
T30	0.343	2.91	27.7	17.5%
T45	0.434	2.30	21.9	34.8%

5. CONCLUSÕES

Os resultados analisados demonstram que a substituição volumétrica progressiva da areia por EPS provoca alterações sistemáticas e interdependentes nas propriedades físicas, mecânicas e térmicas do compósito cimentício. O aumento do teor de EPS reduziu a densidade de 2150 kg/m³ no T0 para 1120 kg/m³ no T45, evidenciando o potencial do polímero para produção de materiais mais leves.

A porosidade aberta aumentou de 12,4% para 22,3%, acompanhando a redução da massa específica e indicando uma estrutura progressivamente mais porosa. Esse comportamento é coerente com o aumento da fração volumétrica de EPS e com a formação de regiões interfaciais capazes de modificar a continuidade da matriz cimentícia, conforme os mecanismos descritos na literatura especializada.

Do ponto de vista mecânico, a resistência à compressão e o módulo de elasticidade dinâmico apresentaram reduções progressivas com o aumento da incorporação de EPS. O comportamento é explicado pela redução da fração mineral rígida, pelo aumento da porosidade, pela maior deformabilidade da fase polimérica e pela menor eficiência da interface EPS-matriz.

Em sentido oposto, a condutividade térmica diminuiu de 1,15 W/m·K para 0,42 W/m·K, demonstrando ganho térmico consistente com o aumento do teor de EPS. Esse resultado confirma o potencial do material para aplicações nas quais a redução da transferência de calor seja desejável.

Entre as formulações avaliadas, o T30 apresenta o compromisso mais interessante dentro do conjunto estudado. A composição alcançou densidade de 1460 kg/m^3 , porosidade de 17,8%, resistência à compressão de 8,4 MPa, módulo dinâmico de 11,1 GPa e condutividade térmica de $0,68 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. Esses valores indicam redução expressiva de massa e de condutividade sem atingir a severidade da perda mecânica observada no T45.

A associação entre aumento da porosidade, redução da rigidez, diminuição da resistência e menor condutividade térmica apresentou coerência física e concordância com estudos recentes sobre compósitos cimentícios contendo EPS. A análise conjunta dessas propriedades sustenta a interpretação de que a fase polimérica e a estrutura de vazios controlam simultaneamente a transferência de calor e a continuidade resistente do material.

Os resultados caracterizam o desempenho do material e fornecem parâmetros para sua aplicação em componentes de vedação. A avaliação segundo a ABNT NBR 15575 deve ser realizada no nível do sistema construtivo completo, considerando composição, espessura, revestimentos, condições de exposição e método de avaliação aplicável.

Como continuidade, o programa de pesquisa pode ser expandido para absorção e transporte de água, retração, resistência à tração na flexão, aderência de revestimentos, durabilidade, comportamento acústico, estabilidade dimensional e desempenho de painéis em escala real. Essas frentes permitirão estabelecer novas correlações entre composição, condições de exposição e desempenho ao longo da vida útil.

Em síntese, os resultados confirmam o compromisso entre leveza, resposta térmica e resistência mecânica. No cenário climático mais quente analisado, o T30 reduziu o fluxo térmico estacionário em aproximadamente 17,5% em relação ao T0, mantendo resistência à compressão de 8,4 MPa. O T45 alcançou redução de 34,8%, porém sua resistência de 3,1 MPa restringe o campo de aplicação. A combinação das propriedades físicas, mecânicas e térmicas confirma o T30 como a formulação mais equilibrada entre as composições estudadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15220-2: Desempenho térmico de edificações - Parte 2: Componentes e elementos construtivos - Resistência e transmitância térmica - Métodos de cálculo. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15575: Edificações habitacionais - Desempenho. Rio de Janeiro: ABNT. Parte 4: Sistemas de vedações verticais internas e externas - versão vigente consultada no catálogo ABNT.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6136-1: Blocos vazados de concreto para alvenaria - Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2026.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM C567/C567M-19: Standard Test Method for Determining Density of Structural Lightweight Concrete. West Conshohocken, 2019.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM C597-22: Standard Test Method for Ultrasonic Pulse Velocity Through Concrete. West Conshohocken, 2022.

BABU, K. G.; BABU, D. S.; WEE, T. H. Properties of lightweight expanded polystyrene aggregate concretes containing fly ash. Cement and Concrete Research, v. 35, n. 6, p. 1218-1223, 2005.

EL GAMAL, S.; AL-JARDANI, Y.; MEDDAH, M. S.; SOHEL, K. M. A.; AL-SAIDY, A. Mechanical and thermal properties of lightweight concrete with recycled expanded polystyrene beads. European Journal of Environmental and Civil Engineering, v. 28, n. 1, p. 80-94, 2024. DOI: 10.1080/19648189.2023.2200830.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Normais Climatológicas do Brasil 1991-2020. Brasília, DF: INMET, 2022. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/uploads/normais/NORMAISCLIMATOLOGICAS.pdf>. Acesso em: 16 set. 2026.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 8302: Thermal insulation - Determination of steady-state thermal resistance and related properties - Guarded hot plate apparatus. Geneva: ISO, 1991.

LI, S.; HU, D.; YU, F.; JIN, Q.; LI, Z. Performance optimization of expanded polystyrene lightweight concrete using a multi-objective physically interpretable algorithm with random forest. Buildings, v. 15, n. 21, 3944, 2025. DOI: 10.3390/buildings15213944.

PRASITTISOPIN, L.; TERMKHAJORNKIT, P.; KIM, Y. H. Review of concrete with expanded polystyrene (EPS): performance and environmental aspects. Journal of Cleaner Production, v. 366, 132919, 2022. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132919.

SHI, J. et al. Influence of paste strength on the strength of expanded polystyrene (EPS) concrete with different densities. Polymers, v. 14, n. 13, 2529, 2022. DOI: 10.3390/polym14132529.

WEI, L.; CHEN, S.; WANG, J.; WU, Z.; SHE, W. Lightweight EPS cementitious composites via hot-pressing strategy: toward mechanical, thermal, and acoustic properties. Journal of Building Engineering, v. 112, 113794, 2025.

¹ Engenharia Civil - UniÚnica - Ipatinga, Minas Gerais, Brasil. Mestre e Doutorando em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Piauí-UFPI, Teresina, Piauí, Brasil. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#). ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9112-758X>. Lattes: <https://lattes.cnpq.br/0156962783585205>

² Mestre em Engenharia Civil. Centro Universitário Santo Agostinho - UNIFSA. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#). Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6898986509322203>

³ Mestre em Engenharia de Materiais - IFPI. Centro Universitário Santo Agostinho – UNIFSA, Teresina, Piauí, Brasil. E-mail: [acesse o](#)

artigo original para visualizar o e-mail. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9820-5148>

⁴ Bacharelado em engenharia mecânica pela UFPI. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#). Lattes: 9853462133464611. Orcid: <https://orcid.org/0009-0006-5771-9384>

⁵ Engenheiro Civil (UNIFSA - Centro Universitário Santo Agostinho). Pós-Graduação em Estrutura de concreto armado e fundações (INBEC - Instituto Brasileiro de Educação Continuada). E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#). Lattes: <http://lattes.cnpq.br/3602607749600725>

⁶ Engenharia Civil - UniÚnica - Ipatinga, Minas Gerais, Brasil. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

⁷ Engenharia Civil - UniÚnica - Ipatinga, Minas Gerais, Brasil. Pós graduado em Engenharia de Segurança do Trabalho pela Faculdade Unimais/SP. Graduado em Engenharia Elétrica pela Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco/PE. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

⁸ Graduação em Engenharia de Produção- Universidade Federal do Piauí-UFPI. Mestrando em Ciência e Engenharia de Materiais - Universidade Federal do Piauí-UFPI. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

⁹ Graduação em Engenharia de Produção - UFPI. Especialização em Logística - UNICSUL. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

¹⁰ Engenheiro Mecânico. Programa de Pós graduação em Ciência e Engenharia de Materiais UFPI. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6216745183433184>. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6886-0418>. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

¹¹ Graduação em Engenharia mecânica. Universidade Federal do Piauí. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#). Lattes: <http://lattes.cnpq.br/3041193881407315>