https://doi.org/10.47456/bjpe.v12i4.52087

ARTIGO ORIGINAL | OPEN ACCESS

NÚCLEO DE PESQUISA EM GESTÃO DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO - NP GSP

Brazilian Journal of Production Engineering
BJPE - Revista Brasileira de Engenharia de Produção
Disponível em: https://periodicos.ufes.br/bjpe

ISSN: 2447-5580

Campus São Mateus
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Universidade Federal do Espírito Santo

UTILIZAÇÃO DA TERMOGRAFIA PARA ANÁLISE DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA DE BLOCOS DE CONCRETO PRODUZIDOS COM ESCÓRIA DE ACIARIA DE FORNO ELÉTRICO

Use of thermography to analyze the thermal diffusivity of a concrete blocks produced with electric arc furnace steel slag

Uso de la termografía para el análisis de la difusividad térmica de bloques de hormigón fabricados con escoria de acería de horno eléctrico

Vanessa Cristine Silva

Universidade Federal de Minas Gerais – Campus Pampulha
vanessacristinesilva@gmail.com

ARTIGO INFO.

Recebido: 18.03.2026
Aprovado: 02.09.2026
Disponibilizado: 06.11.2026

PALAVRAS-CHAVE: *Escória de Aciaria; Difusividade Térmica; Termografia Infravermelha.*
KEYWORDS: *Steel Slag; Thermal Diffusivity; Infrared Thermography.*
PALABRAS CLAVE: *Escoria de fabricación de acero; Difusividad térmica; Termografía infrarroja.*

***Autor Correspondente**: **Silva, V. C.**

RESUMO

Observando o aumento da sensação térmica nos ambientes provocado pelo aquecimento global, maneiras de melhorar o conforto térmico das edificações têm sido amplamente estudadas. Em função da necessidade de construções com maior desempenho térmico e eficiência energética, a utilização de materiais com menor difusividade térmica é essencial para a obtenção de ambientes mais confortáveis. Visando a utilização de um material mais sustentável na construção civil, este trabalho tem como objetivo analisar o comportamento térmico de um bloco de concreto vazado com adição de escória de aciaria elétrica utilizando câmera termográfica e comparar com outros blocos convencionais. Para alcançar o objetivo proposto, a metodologia experimental empregada se baseia na avaliação da difusividade térmica do bloco de concreto vazado de escória de aciaria elétrica submetido a uma fonte de calor ambos posicionados no interior de um invólucro com material isolante. O método considera a condução de calor transiente unidimensional e utiliza câmera infravermelha para determinação das temperaturas da face externa do bloco. Os resultados indicam que o bloco de concreto com escoria de aciaria elétrica apresenta um valor maior de difusividade térmica comparado aos blocos de concreto convencionais. Ademais, esse estudo comprova a eficiência da termografia na construção civil como ensaio não destrutivo de rápida medição dos fenômenos que envolvem a transferência de calor.

ABSTRACT

Regarding the increasing thermal sensation in the environments caused by global warming, ways to improve the thermal comfort of buildings have been extensively studied. Due to the need for constructions with higher thermal performance and energy efficiency, the use of materials with lower thermal diffusivity is essential to obtain more comfortable environments. Aiming at the use of a more sustainable material in civil construction, this work seeks to analyze the thermal behavior of a concrete block with the addition of electric steel slag using thermographic camera and compare with others conventional blocks. In order to reach the proposed objective, the experimental methodology used is based on the evaluation of the thermal diffusivity of the concrete block with electric steel slag submitted to a heat source both positioned inside a casing with insulation material. The method considers one-dimensional transient heat conduction and uses an infrared camera to determine the temperatures of the outer face of the block. The results indicate that the concrete block with electric steel slag presents a higher value of thermal diffusivity compared to conventional concrete blocks. In addition, this study proves the efficiency of thermography in civil construction as a non-destructive test of rapid measurement of phenomena involving heat transfer.

RESUMEN

Ante el aumento de la temperatura percibida en interiores causado por el calentamiento global, se han estudiado ampliamente formas de mejorar el confort térmico de los edificios. Dada la necesidad de edificios con mayor rendimiento térmico y eficiencia energética, el uso de materiales con menor difusividad térmica es esencial para lograr entornos más confortables. Con el objetivo de utilizar un material más sostenible en la construcción civil, este trabajo analiza el comportamiento térmico de un bloque hueco de hormigón con escoria de horno de arco eléctrico mediante una cámara termográfica y lo compara con otros bloques convencionales. Para lograr el objetivo propuesto, la metodología experimental empleada se basa en la evaluación de la difusividad térmica de un bloque hueco de hormigón fabricado con escoria de horno de arco eléctrico, sometido a una fuente de calor, ambos ubicados dentro de un recinto con material aislante. El método considera la conducción térmica transitoria unidimensional y utiliza una cámara infrarroja para determinar las temperaturas de la cara exterior del bloque. Los resultados indican que el bloque de hormigón con escoria de horno de arco eléctrico presenta un valor de difusividad térmica superior al de los bloques de hormigón convencionales. Además, este estudio demuestra la eficacia de la termografía en la construcción civil como ensayo no destructivo para la medición rápida de fenómenos relacionados con la transferencia de calor.

CC BY 4.0 DEED Attribution 4.0 International

INTRODUÇÃO

A termografia infravermelha é uma técnica não destrutiva empregada na análise da temperatura superficial e dos processos de transferência e ganho de calor em materiais opacos, por meio da obtenção de termogramas que mapeiam o comportamento térmico do objeto em estudo. O sistema utilizado é composto por uma câmera térmica, responsável pela captação da radiação infravermelha emitida pela superfície do objeto, e pelo *software* FLIR Tools, destinado à análise e ao processamento das imagens térmicas. Esse *software* permite correlacionar a intensidade registrada na imagem digital com o campo de distribuição da temperatura superficial do material analisado. Entre as principais vantagens da termografia infravermelha, destacam-se a elevada sensibilidade dos sistemas termográficos modernos, a facilidade de operação, a rapidez na aquisição dos dados e a obtenção de resultados em tempo reduzido.

Adicionalmente, a técnica apresenta elevada versatilidade para o processamento e a análise das imagens térmicas, ou termogramas, possibilitando a avaliação de objetos em movimento e a obtenção de informações térmicas em regiões de difícil acesso, confinadas ou que apresentem riscos à segurança do operador. Essas características tornam a termografia infravermelha uma técnica particularmente adequada para aplicações que requerem medições sem contato direto com o objeto analisado (Chrzanowski, 2000; 2001).

Nesse contexto, a câmera infravermelha atua como um radiômetro espectral capaz de medir essa energia de agitação, possibilitando a captação de imagens térmicas e a determinação da temperatura superficial de um corpo (Barreira, 2016; Bergman, 2014; Chrzanowski, 2010; Grys, 2014; Irwin, 2014; Minkina, 2009). O objetivo deste experimento consiste em avaliar a difusividade térmica de um bloco de concreto com adição de escória de aciaria proveniente de forno elétrico a arco (FEA), utilizando a câmera termográfica FLIR i60 para o monitoramento da distribuição temporal e espacial da temperatura superficial durante o ensaio.

A temperatura e a radiação térmica refletem o grau de agitação das moléculas de um material. Assim, quanto maior essa agitação molecular, maior será a temperatura e, consequentemente, maior será a emissão de radiação térmica pelo material. Os dados termográficos obtidos serão empregados na determinação da difusividade térmica do material, conforme a metodologia experimental adotada. No teste, utiliza-se o bloco de concreto específico como alvo, que foi aquecido por 14 minutos por uma lâmpada de 1.000 W dentro de uma caixa térmica. O concreto é amplamente utilizado na construção civil, porém desempenha, em geral, um papel passivo em relação às funções energéticas. A transformação desse material, de um elemento exclusivamente estrutural para uma plataforma multifuncional capaz de interagir com fluxos térmicos e energéticos, representa uma oportunidade promissora para o avanço da construção sustentável (Deng et al., 2026).

REVISÃO TEÓRICA

DIFUSIVIDADE TÉRMICA

A difusividade térmica é uma importante propriedade associada à caracterização de materiais construtivos, pois representa a capacidade de um material conduzir calor em relação à sua capacidade de armazenar energia térmica (Migunthanna et al., 2026). Essa técnica vem sendo

CC BY 4.0 DEED Attribution 4.0 International

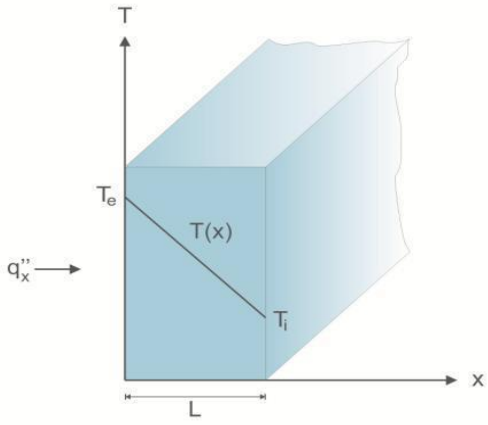
empregada para mensurar, avaliar e/ou analisar as características de materiais em uma variedade de investigações que envolvem os fenômenos de transferência de calor.

Estudos e aplicações práticas estão sendo direcionados ao trato do conforto térmico de edificações. Na literatura, entretanto, os estudos relacionados a essa temática ainda são incipientes (Barbosa, 2014; González Cruz, 2003; Ma et al., 2021). A difusividade térmica (α) é uma propriedade física relacionada à condutividade térmica (λ), ao calor específico (Cp) e à densidade (ρ) do material. Sua determinação requer, necessariamente, a realização de medições experimentais.

Os métodos baseados no regime transiente apresentam como principal vantagem a rapidez na obtenção dos resultados. Contudo, exigem procedimentos mais complexos para o processamento dos dados experimentais, além da utilização de sistemas e instrumentos de medição relativamente avançados. Além disso, sua aplicação demanda elevado nível de especialização em ciências térmicas, conhecimento que nem sempre está prontamente disponível nos departamentos de engenharia e projetos voltados à área da construção civil.

Alguns métodos possibilitam a determinação da difusividade térmica e, simultaneamente, de outras propriedades termofísicas dos materiais, como a resistividade térmica e o calor específico. A determinação dessa importante propriedade física fundamenta-se na solução da equação de condução de calor de Fourier, formulada em coordenadas cartesianas bidimensionais e cilíndricas e adaptada às condições de elevadas condutividades superficiais (Baïri et al., 2007; Sellami et al., 2022). Para entender melhor a Lei de Fourier, cabe destacar que a expressão “em regime permanente” indica que as condições térmicas (temperatura e fluxo de calor) nas superfícies de contorno não variam ao longo do tempo, tendo atingido uma situação de equilibro. Nesses termos, a lei estabelece que o calor transferido por condução (q) é diretamente proporcional à área (A), à condutividade térmica do material (k) e à diferença de temperatura ($\Delta T = T1 - T2$), e inversamente proporcional ao comprimento (ou espessura) do material (L) (Flores Larsen et al., 2004) (Figura 1).

Figura 1. Transferência de calor unidimensional por condução em uma parede plana



Fonte: Adaptado de Bergman et al., 2011.

A difusão envolve o fluxo de calor entre dois meios (sólidos, líquidos ou gasosos) que se tocam ou mesmo entre partes de um meio que estejam a diferentes temperaturas. Em nível microscópico, a condução se dá pela comunicação molecular direta, processo no qual há transferência de energia cinética entre as moléculas constituintes dos meios (Barbosa, 2014; Bergman et al., 2011).

CC BY 4.0 DEED Attribution 4.0 International

A difusividade térmica determina a taxa de transferência de calor transiente e governa a difusão térmica, os gradientes de temperatura e a resposta térmica dos materiais sob cargas térmicas variáveis no tempo (Deng et al., 2018; Kagata et al., 2025; Sun et al., 2025; Wang et al., 2025; White et al., 2022). A modelagem da geração e transferência de calor no concreto é essencial para a compreensão desse material como um todo. Entretanto, a difusividade do concreto é afetada por diversos fatores, incluindo as características do material e as condições ambientais (Xu et al., 2020).

O histórico térmico do concreto durante a hidratação afeta a taxa e a extensão da reação, assim como as propriedades finais do espécime (Chirdon et al., 2007; Jin et al., 2015). A maioria das propriedades termofísicas do concreto diminui com o aumento da temperatura, com exceção do calor específico. Em particular, a condutividade e a difusividade apresentam uma redução de 50% a 900 °C em comparação com os valores à temperatura ambiente. O calor específico aumenta até 500 °C, diminui de 700 a 900 °C e volta a aumentar acima de 900 °C (Shin et al., 2002). Com base nos resultados da literatura, a difusividade térmica do concreto varia na faixa de $5{,}090 \times 10^{-8}$ a $1{,}283 \times 10^{-5}$ m/s² (Noh et al., 2017). O concreto é um material com uma grande variedade de componentes e, como tal, apresenta uma ampla gama de valores possíveis para esse parâmetro (Owczarek et al., 2021).

ESCÓRIA DE ACIARIA DE FORNO ELÉTRICO (FEA)

A escória de aciaria de FEA é, hoje, a maneira mais comum para a reciclagem de aço a partir da sucata. A utilização desses resíduos industriais pode agregar valor à construção civil e contribuir para o desenvolvimento de projetos de edificações sustentáveis (Diotti et al., 2021). A escória de aciaria (FEA) é reconhecida na indústria como uma matéria-prima valiosa, dadas as suas inerentes e excelentes propriedades químicas, físicas e mineralógicas semelhantes às da rocha natural (Silva, 2014). Nessa perspectiva, ela constitui um coproduto com potencial para proporcionar benefícios ambientais, sociais e econômicos aos projetos de construção civil. Esse material não metálico é constituído predominantemente por silicatos e óxidos formados durante o processo de refino do aço fundido (Figura 2).

Figura 2. Escória de aço utilizada em forno elétrico a arco (FEA)



Fonte: Silva (2014).

Argamassas e concretos de boa qualidade têm sido produzidos por diversas equipes de pesquisa em diferentes países utilizando escória de forno elétrico (Mombelli et al., 2019; Monosi et al., 2016; Santamaría et al., 2017; Ting et al., 2025). A viabilidade dessas misturas foi demonstrada por meio da obtenção de níveis adequados de desempenho e durabilidade, resultando em materiais potencialmente competitivos. Entretanto, um dos principais obstáculos à incorporação da escória de FEA como matéria-prima em aplicações industriais de

CC BY 4.0 DEED Attribution 4.0 International

maior valor agregado está relacionado à variabilidade de sua composição química. Essa variação pode ocorrer em função das características e da composição da sucata metálica empregada no processo de produção do aço. Entre as principais desvantagens associadas à sua utilização, destacam-se a menor trabalhabilidade das misturas e a maior densidade em comparação aos materiais convencionais produzidos com agregados naturais. Uma alternativa para minimizar os efeitos da elevada densidade consiste no aumento da resistência mecânica do material, de modo a manter a relação resistência/densidade em níveis semelhantes aos observados no concreto convencional (Teo et al., 2020).

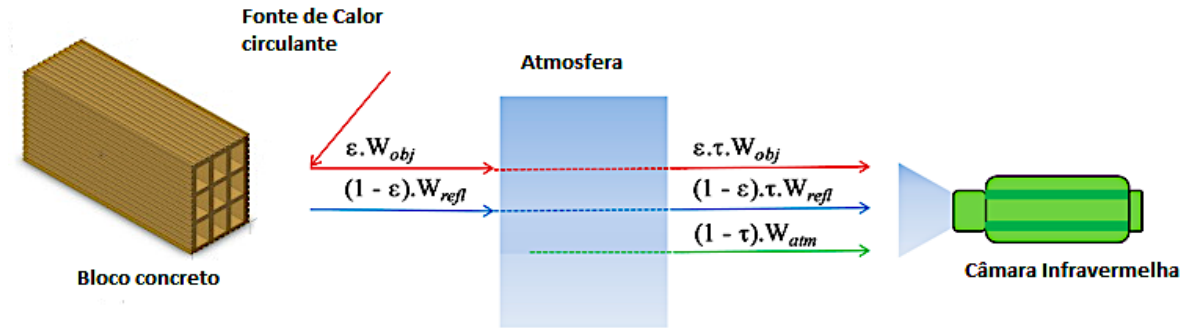
ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS POR TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA

As medições termográficas envolvem a captação e a análise da radiação infravermelha emitida pelos objetos, possibilitando a visualização da distribuição da temperatura em suas superfícies. Amplamente empregada nas áreas de engenharia, medicina, diagnóstico de edificações e inspeção industrial, a termografia infravermelha constitui uma ferramenta de diagnóstico não invasiva, utilizada para avaliar o desempenho, a confiabilidade e o comportamento térmico de sistemas e materiais (Pratticò et al., 2025).

A evolução do fluxo de calor é observada por uma câmera infravermelha que registra a radiação emitida pela superfície do alvo em uma faixa de comprimento de onda específica no espectro infravermelho, representando esses resultados como imagens, chamadas termogramas (You et al., 2026). As informações adquiridas são transferidas para um computador para posterior interpretação ou pós-processamento. As inspeções termográficas por infravermelho consistem basicamente na medição e interpretação do campo de temperatura na superfície externa de um objeto em observação.

Variações nas propriedades térmicas internas de um material produzem diferenças na distribuição de um fluxo de calor previamente estabelecido, o que resulta, consequentemente, no surgimento de indicações térmicas na área observada e torna essas anomalias visíveis para um sensor de infravermelho (Venegas et al., 2018). Cada *pixel* representa um ponto térmico que é exibido em uma tela ou imagem, a chamada imagem infravermelha térmica. No entanto, ao medir um objeto, a câmera infravermelha não recebe apenas a radiação emitida pelo objeto, mas também a radiação de outras fontes, como objetos ao redor ou a atmosfera (Figura 3).

Figura 3. Princípio de funcionamento de uma câmera térmica infravermelha que recebe radiação



Fonte; Adaptada, Tran et al., 2017.

A radiação total (W_{tot}) recebida pela câmera infravermelha compreende três componentes principais: a radiação emitida pelo objeto, a radiação emitida pelo entorno e refletida pela superfície do objeto e a radiação emitida pela atmosfera (Tran et al., 2017).

CC BY 4.0 DEED Attribution 4.0 International

METODOLOGIA

Utilizou-se um bloco de alvenaria de concreto contendo escória de aciaria de FEA, com dimensões de 14 × 19 × 29 cm. Para a realização do experimento, foi empregada uma caixa térmica confeccionada em madeira MDF, com espessura de 1 cm e dimensões de 0,47 × 0,70 × 0,27 m. A caixa foi revestida internamente com placas isolantes de 25,4 mm de espessura e equipada com uma lâmpada halógena de 1.000 W, utilizada como fonte de aquecimento. Para mensurar os valores de temperatura da face externa do bloco, foram utilizados os seguintes equipamentos: uma câmera infravermelha FLIR Systems i60, o *software* FLIR Tools para análise dos termogramas, um termo-higrômetro modelo Teslo 622 para medição da temperatura ambiente e da umidade relativa do ar, e uma trena de aço para aferição das dimensões do experimento.

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O ensaio foi realizado no laboratório de concreto da Universidade Federal de Minas Gerais, em Belo Horizonte. O procedimento consistiu em submeter o bloco de concreto de escória de aciaria elétrica ao aquecimento gerado pela lâmpada halógena de 1.000 W no interior da caixa de madeira com material isolante, permitindo a condução de calor pelo bloco e minimizando as perdas de calor pelas laterais.

A temperatura da face externa do bloco de concreto foi monitorada, em intervalos de 30s, até que atingisse uma variação de 5°C. Durante o teste, para obter os termogramas, foi necessário configurar a termocâmera para o monitoramento da temperatura inicial de 24,6 à final de 31,9°C. Desse modo, foi necessário o ajuste dos parâmetros do termovisor para iniciar os trabalhos e editar os *inputs*, que são: temperatura do ambiente (T_{amb}= 26°C); umidade relativa do ar pelo termo-higrômetro modelo Teslo Modelo 622 (43,7% UR); emissividade (Ɛ= 0,95); e distância da câmera ao bloco (L= 0,90m). O bloco foi posicionado na parte frontal da caixa e vedada na parte superior, de modo que apenas uma superfície ficasse em contato com o fluxo de calor e a outra ficasse exposta para leitura da temperatura pelo sensor da câmera FLIR i60, que foi posicionado a 0,9 m de distância da face externa do bloco durante 14 minutos, com intervalos programados de 1 minuto para os registros dos termogramas (Figura 4).

Figura 4. Aparato experimental com o bloco de escória FEA, caixa de madeira e câmera - *FLIR i60*



Fonte: Autores, 2026.

EQUAÇÕES

Difusividade do Bloco de Concreto com Escória de Aciaria

As grandezas associadas à difusividade térmica são dadas pelas equações (1) e (2), que apresentam a relação entre a condutividade térmica e a capacidade calorífica volumétrica:

$$\alpha = \frac{k_{bloco}}{\rho * c_p} \quad (1)$$

$$k_{bloco} = 0{,}69\ (\frac{W}{mK})$$

CC BY 4.0 DEED Attribution 4.0 International

A condutividade térmica indica as propriedades de condução térmica dos materiais, enquanto a difusividade térmica não apenas reflete essas propriedades, mas também leva em consideração os efeitos do calor específico e da densidade. Na condução de calor em regime permanente, a condutividade térmica determina a capacidade de transmissão de calor, pois a temperatura interna dos materiais não varia com o tempo. Por outro lado, na condução em regime transiente, a temperatura dos materiais varia com o tempo, de modo que a difusividade térmica determina a distribuição de temperatura (Li et al., 2023). Na literatura pesquisada (Franco, 2015), o bloco apresenta condutividade térmica k= 0,69 (W/mK). Onde: α é a difusividade térmica (m^2/s), *k* é a condutividade térmica (W/mK), ρ é densidade (kg/m^3) e C_p é o calor específico a pressão constante (J/kg.K) do material.

Densidade:
$$\rho = \frac{m}{v} \tag{2}$$
$$massa = 12\ kg$$
$$volume = 0{,}004123\ (\frac{kg}{m^3})$$

Calor Específico:
$$C_p = \frac{\dot{Q} * Tempo}{m * \Delta T} \tag{3}$$
$$\Delta T = T_{final} - T_{inicial}$$

A capacidade calorífica volumétrica de um material é uma propriedade relacionada à sua habilidade em armazenar energia térmica. É expressa em J/m³.K e dada pelo produto entre a massa específica (ρ) e o calor específico (*cp*). A massa específica (kg/m³) mede o grau de concentração de massa de um material em determinado volume. O calor específico, ou capacidade calorífica específica, por sua vez, é uma propriedade relacionada à habilidade do material absorver calor de sua vizinhança, representando a quantidade de energia exigida para produzir um aumento unitário na temperatura para uma unidade de massa da substância, tendo como unidade de medida J/kg.K.

Volume do Bloco:
$$Volume = \left[\text{Área do Bloco Maçico} - \left(\text{Área Vazada do Bloco}\right) \text{x } 2\right] \text{x Altura do bloco} \tag{4}$$

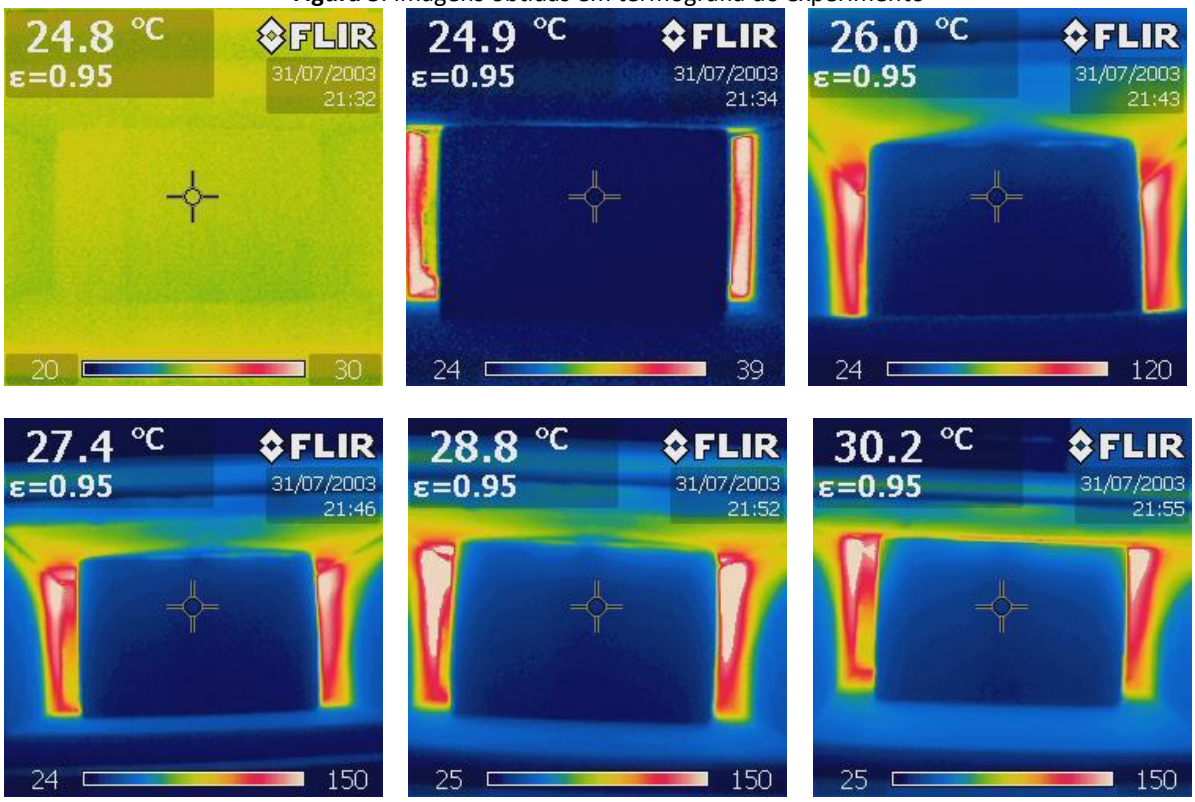
Apesar de a condutividade térmica, a massa específica e o calor específico serem as três propriedades elementares de qualquer material do ponto de vista térmico, o estudo do comportamento desses materiais em regime transiente obriga a introdução da difusividade térmica, propriedade complexa dada, como visto, pela combinação das citadas propriedades elementares (Gonzáles Cruz, 2003).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A difusividade do bloco de concreto com escória de aciaria foi avaliada pelo modelo de transferência de calor em regime transiente. O cálculo foi realizado a partir do volume da amostra calculado (*V* = 0,004123 m³), da massa fornecida (12 kg), do tempo em que a lâmpada halógena de 1.000 W emitiu o fluxo de calor constante por radiação, da variação da temperatura (ΔT) calculada e da condutividade térmica (k = 0,69 W/mK) encontrada por Franco (2015). Apresenta-se, a seguir, a Figura 5, contendo os termogramas obtidos em intervalos programados de 1 minuto. As temperaturas registradas para os pontos fixados no termograma variaram entre 24,8 e 30,2 °C.

CC BY 4.0 DEED Attribution 4.0 International

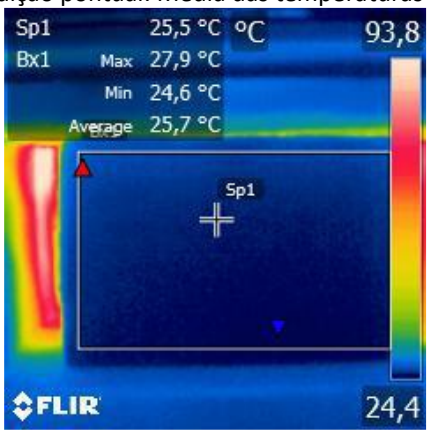
Figura 5. Imagens obtidas em termografia do experimento



Fonte: Autores, 2026.

Ao analisar os termogramas, é possível perceber a geometria interna de cada bloco em seus respectivos processos de aquecimento. Como as laterais do bloco não foram isoladas, permitindo a dissipação do calor por essas superfícies, era esperado observar, por meio dos termogramas, a presença de áreas com temperaturas mais elevadas nas proximidades da fonte de calor. Outro detalhe esperado nas imagens está relacionado com as áreas vazadas do bloco, porém o material não atingiu uma temperatura suficiente para permitir a visualização dos espaços (Figura 6).

Figura 6. Área demarcada, empregada para representar de forma mais fidedigna o valor da temperatura da superfície do que a medição pontual. Média das temperaturas pelo Software FLIR tool



Fonte: Autores, 2026.

Apresenta-se assim valores de cada grandeza para determinar o desempenho da difusividade térmica do bloco de concreto com escória de aciaria elétrica: tempo (*s*); temperatura (°C); variação da temperatura (ΔT); calor específico (*Cp*); a difusividade térmica (α). Nessa etapa, houve o monitoramento da variação de temperatura em função do tempo das superfícies interna e externa da amostra em estudo, via termocâmera, durante 14 minutos (Tabela 1).

CC BY 4.0 DEED

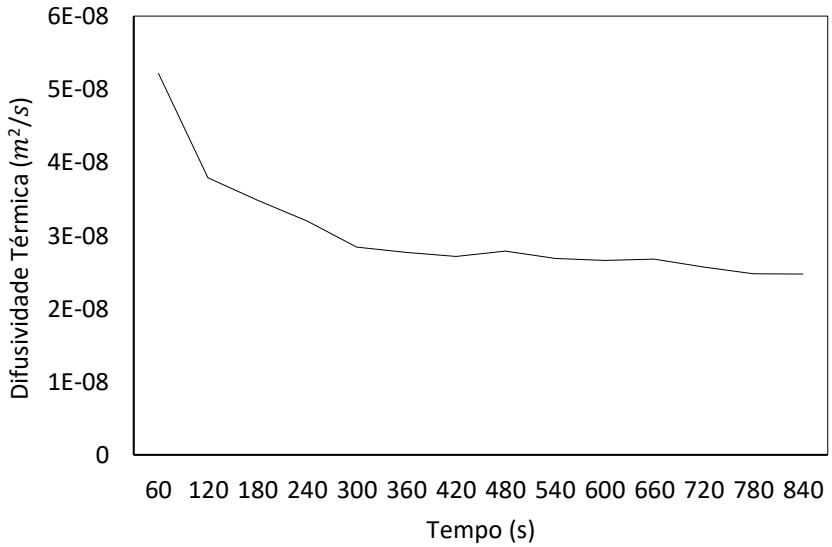
Tabela 1. Valores das grandezas calculadas no experimento

Tempo (s)	Temperatura (ºC)	ΔT	Cp	α (Difusividade) m²/s
0	24,7	0	0	0
60	25,7	1,1	4545,454545	5,2156E-08
120	26,2	1,6	6250	3,79316E-08
180	26,8	2,2	6818,181818	3,47707E-08
240	27,3	2,7	7407,407407	3,20048E-08
300	27,6	3	8333,333333	2,84487E-08
360	28,1	3,5	8571,428571	2,76585E-08
420	28,6	4	8750	2,7094E-08
480	29,3	4,7	8510,638298	2,7856E-08
540	29,7	5,1	8823,529412	2,68682E-08
600	30,2	5,6	8928,571429	2,65521E-08
660	30,8	6,2	8870,967742	2,67246E-08
720	31,1	6,5	9230,769231	2,56829E-08
780	31,4	6,8	9558,823529	2,48014E-08
840	31,9	7,3	9589,041096	2,47233E-08

Fonte: Autores, 2026.

As temperaturas apresentadas na segunda coluna do gráfico foram encontradas a partir de uma área retangular desenhada no bloco em cada termograma, obtido com o uso do *software* FLIR Tools (Figura 5). Acredita-se que, por meio da área demarcada, é possível representar melhor o valor da temperatura da superfície do que um valor pontual de temperatura. As grandezas associadas à difusividade térmica são calculadas pela Equação 1, relação entre a condutividade térmica e a capacidade calorífica. No gráfico da Figura 7, apresentam-se os valores da difusividade térmica do bloco de concreto vazado com escória de aciaria elétrica, os quais exibiram redução acentuada nos intervalos de tempo compreendidos entre 100 e 300 segundos. No entanto, observa-se que, no patamar de 300 a 900 segundos, os valores da difusividade se mantiveram constantes no decorrer do tempo (Tabela 2).

Figura 7. Gráfico da difusividade do bloco de concreto com escória de aciaria vazado



Fonte: Autores, 2026.

Tabela 2. Comparação dos resultados da literatura versus experimento

Bloco convencional	α (Difusividade) m²/s	Fonte
Bloco vazado de argila	1,8 x 10^{-7}	Barbosa, 2014
Bloco vazado de concreto	3,03 x 10^{-7}	Barbosa, 2014
Bloco vazado de concreto com escória de aciaria	(Σ das médias α) = 4,23 x 10^{-7}	dos autores, 2026

Fonte: Autores, 2026.

CC BY 4.0 DEED Attribution 4.0 International

O valor médio da difusividade térmica foi obtido a partir do volume e da massa da amostra, do tempo em que a lâmpada halógena de 1.000 W emitia fluxo de calor constante por radiação, do ΔT calculado e da condutividade térmica encontrada na literatura (k = 0,69 W/mK). O experimento teve a duração de 540 segundos, tempo necessário para observar uma diferença de temperatura de 5 °C. A difusividade do bloco de concreto com escória de aciaria apresentou um valor maior da difusividade térmica comparado aos outros tipos de blocos. Esse resultado indica que os blocos vazados de concreto com escória de aciaria têm respostas mais rápidas às alterações de temperatura impostas ao seu entorno, demonstrando ser inferior aos blocos convencionais.

Na literatura pesquisada, uma baixa difusividade térmica permite que o material resista melhor à transferência de calor, resultando em uma propagação mais lenta do calor dentro do material. No entanto, é muito difícil prever a difusividade do concreto de forma realista, pois ela é influenciada por muitos parâmetros, a exemplo da propriedade da zona interfacial entre as partículas de agregado e a pasta de cimento e da microestrutura da própria pasta de cimento (porosidade e estrutura dos poros). Além disso, métodos de ensaio padronizados para a difusividade do concreto ainda não foram estabelecidos, principalmente devido às dificuldades de medição (Zahrani et al., 2026).

Análise de Erros e Incertezas de Medição em Equipamentos Termográficos

A quantificação das incertezas permite compreender os mecanismos de propagação dos erros associados ao processo de medição. A incerteza de medição constitui um parâmetro associado ao resultado de uma medição, caracterizando a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos à grandeza mensurada. No que se refere aos equipamentos, a câmera termográfica está sujeita a incertezas associadas à precisão do sensor, à resolução espacial e térmica, à calibração do equipamento e à definição dos parâmetros radiométricos, especialmente emissividade, temperatura refletida e distância entre a câmera e o objeto analisado. O termo-higrômetro, por sua vez, apresenta incertezas relacionadas à precisão das medições de temperatura e umidade relativa do ambiente, podendo influenciar a determinação das condições ambientais consideradas na análise termográfica.

Adicionalmente, devem ser consideradas as incertezas decorrentes das aproximações adotadas no modelo experimental. A definição da emissividade do bloco constitui uma importante fonte de incerteza, uma vez que esse parâmetro pode variar em função da composição, da rugosidade, da temperatura e das condições superficiais do material. Também devem ser consideradas as perdas de calor não contempladas integralmente na análise, tais como as perdas por convecção e radiação para o ambiente, além dos possíveis efeitos de condução térmica através dos elementos de suporte e das paredes da caixa experimental.

Os erros de medição associados à termometria por radiação decorrem, principalmente, dos fatores descritos a seguir: (i) erros decorrentes do método de medição: em condições reais de operação, as principais fontes de erro estão relacionadas à determinação da emissividade da superfície, à influência da radiação térmica emitida pelo ambiente e à transmissão da radiação através da atmosfera entre o objeto e o sensor; (ii) erros decorrentes da calibração do instrumento: os equipamentos empregados nas medições têm certificados de calibração com rastreabilidade, emitidos por laboratórios acreditados e reconhecidos pela International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC), contribuindo para a confiabilidade e a

CC BY 4.0 DEED Attribution 4.0 International

rastreabilidade metrológica das medições realizadas; (iii) erros decorrentes da eletrônica do instrumento: esses erros, predominantemente sistemáticos, podem resultar de fatores relacionados aos componentes eletrônicos do equipamento, tais como ruído do detector e instabilidades ou flutuações no ganho dos amplificadores e outros componentes eletrônicos, afetando a resposta do sistema de medição; e (iv) incertezas associadas à emissividade da superfície: os valores de emissividade foram configurados de acordo com o tipo de material analisado, sendo adotado o valor de ε = 0,95 para as superfícies de concreto.

Assim, a definição adequada desse parâmetro é fundamental, uma vez que a emissividade influencia diretamente a precisão das leituras de temperatura aparente da superfície. Ressalta-se que a emissividade pode variar em função das características superficiais do material, tais como rugosidade, composição, umidade e temperatura.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O método experimental proposto mostrou-se adequado para a avaliação da difusividade térmica de blocos de escória de aciaria de FEA. A partir dos resultados obtidos nesta pesquisa, concluiu-se, no que se refere à contribuição para o conforto térmico no interior das edificações, que o bloco de escória é menos indicado para a conformação da alvenaria, uma vez que a sua difusividade é maior que a dos demais materiais. Acredita-se que a contribuição das camadas de ar dos blocos vazados seja determinante para o resultado obtido. A técnica experimental proposta mostrou-se eficaz para a avaliação da difusividade térmica do bloco de concreto. As contribuições de cada grandeza de entrada variam significativamente de uma medição a outra para a estimativa da difusividade térmica. A curva de difusividade térmica em função do tempo tende a um valor constante, conforme esperado para esse tipo de material.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT. (2012). NBR 15572: ensaios não destrutivos - Termografia - Guia para inspeção de equipamentos elétricos e mecânicos. Rio de Janeiro: *ABNT*. https://www.normas.com.br

Baïri, A., García de María, J. M., & Laraqi, N. (2007). Thermal diffusivity measurements of building materials based on 2D models. *Computational materials science*, 38(4), 838-46. 10.1016/j.commatsci.2006.06.002

Barbosa, P. G. (2014). Uma contribuição para o design do conforto: avaliação da difusividade térmica de blocos cerâmicos e de concreto utilizando a termografia infravermelha. Dissertação de mestrado, *Universidade do Estado de Minas Gerais*, Belo Horizonte. https://anapaulanasta.com

Barreira, E., Almeida, R. M. S. F., & Delgado, J. M. P. Q. (2016). Infrared thermography for assessing moisture rlated phenomena in building components. *Construction and Building Materials*. 110, 251-69. 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.026.

Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P., & Dewitt, D. P. (2011). Fundamentals of heat and mass transfer. 7ed. *John Wiley & Sons, Inc*. https://madar-ju.com

Chrzanowski, K. (2010). *Testing thermal imagers - practical guide*. P.P.H Remigraf, 11. Ratuszowa Str., 03-430. Warsaw, Poland. http://inframet.su

Chrzanowski, K. (2001). Non-contact thermometry - measurement errors. *Research & Development Treatises*, 7, Polish Chapter of SPIE, Warsaw. https://inframet.com

Chrzanowski, K., Fischer J., & Matyszkiel R. (2000). Testing and evaluation of thermal cameras for absolute temperature measurement. *Journal of Optical Engineering*. 39(9), 2535-44. 10.1117/1.1287832

Chrzanowski, K. & Park, S. N. (2001). Evaluation of thermal cameras for non-destructive thermal testing applications. *Infrared Physics & Technology*, 42, 101-5. 10.1016/S1350-4495(00)00062-1

Chirdon, W. M., Aquino, W, & Hover, K. C. (2007). A method for measuring transient thermal diffusivity in hydrating Portland cement mortars using an oscillating boundary temperature. *Cement And Concrete Research*, 37(5), 680-90. 10.1016/j.cemconres.2007.01.010

Deng, J., et al. (2018). Thermal diffusivity of coal and its predictive model in nitrogen and air atmospheres. *Applied Thermal Engineering*. 130, 1233-45. 10.1016/j.applthermaleng.2017.11.102

Deng, L., et al. (2026). Thermoelectric energy-harvesting concrete modules for multifunctional building elements. *Cement and Concrete Composites*. 171, 106648. 10.1016/j.cemconcomp.2026.106648

CC BY 4.0 DEED Attribution 4.0 International

Diotti, A., et al. (2021). Sustainable recycling of electric arc furnace steel slag as aggregate in concrete: effects on the environmental and technical performance. *Sustainability*. 13(2), 521. 10.3390/su13020521

Flir Systems. (2012). The User's manual FLIR Exx series: a ResourceGuide for using Infrared in the research and development industry, United Kingdom: *Instrumart*. https://www.instrumart.com

Flores, L. S. & Lesino, G. (2004). Medicion de la difusividad térmica de materiales de construcción. *Revista de la Construcción*, Pontificia Universidad Católica de Chile. 1(3), 24-31. https://buscador.bibliotecas.uc.cl

Franco, L. C. (2015). Concretos e argamassas sustentáveis aplicados à habitação de interesse social. Dissertação de mestrado, *Universidade Federal de Ouro Preto*. https://educapes.capes.gov.br

García-López, C. & Álvarez-Tey, G. (2022). Evaluation of the uncertainty of surface temperature measurements in photovoltaic modules in outdoor operation. *Sensors*, 22(15), 5685. 10.3390/s22155685

González, C. E. M. (2003). Seleccion de materiales em la concepcion arquitectonica bioclimática. *Instituto de Investigaciones de la Facultad de Arquitectura y Diseño (IFAD). Universidad Del Zulia*, Maracaibo/Venezuela. https://www.academia.edu

Gonzalez, R. C. & Woods, R. C. (2010). Processamento Digital de Imagens. 3ªed. São Paulo: *Pearson Prentice Hall*. https://www.bvirtual.com.br

Grys, S., Vokorokos, L., & Borowik, L. (2014). Size determination of subsurface defect by active thermography - Simulation research. *Infrared Physics & Technology*, 62, 147-53. 10.1016/j.infrared.2013.11.011

Grossi, P. A., Camarano, D. das M., Ferreira, R. A. N., & Andrade, R. M. de. (2007). Metodologia para a estimativa da incerteza de medição da difusividade térmica pelo método do Flash Laser. In: *8º Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica*. Cusco. https://www.abcm.org.br

Irwin, A. & Grigor, J. (2014). An alternate method for performing MRTD measurements. Infrared Imaging Systems: design, analysis, modeling, and testing. XXV, Ed. Holst, G. C. & Krapels, K. A. *Proc. of SPIE*. 9071, 1-7. https://sbir.com/wp-content

Jin, L., et al. (2015). Multi-scale analytical theory of the diffusivity of concrete subjected to mechanical stress. *Construction and Building Materials*. 95, 171-85. 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.123

Kagata, K., et al. (2025). Investigation of thermal diffusivity measurement technique based on photoacoustic signal response under the influence of three-dimesional heat transfer. *Applied Thermal Engineering*, 258, 124519. 10.1016/j.applthermaleng.2024.124519

Li, Z., et al. (2023). Recent advances and challenges in the inverse identification of thermal diffusivity of natural ice in China. *Water*. 15(6), 1041. 10.3390/w15061041

Ma, A., et al. (2021). Measuring thermophysical properties of building insulation materials using transient plane heat source method. *Energy and Buildings*, 240, 110891. 10.1016/J.ENBUILD.2021.110891

Migunthanna, J., et al. (2026). Developing eco-friendly foam concrete with waste clay bricks and recycled polypropylene fibre. *Next Sustainability*, 7, 100263. 10.1016/j.nxsust.2026.100263

Minkina, W. & Dudzik, S. (2009). Infrared thermography errors and uncertainties. 1ª ed., *Wiley*. https://api.pageplace.de

Mombelli, D., et al. (2019). The influence of slag tapping method on the efficiency of stabilization treatment of electric arc furnace carbon steel slag (EAF-C). *Minerals*. 9(11), 706. 10.3390/min9110706

Monosi, S., Ruello, M. L., & Sani, D. (2016). Electric arc furnace slag as natural aggregate replacement in concrete production. *Cement and concrete composites.* 66, 66-72. 10.1016/j.cemconcomp.2015.10.004

Motz, H., Ehrenberg, A., & Mudersbach, D. (2013). Dry solidification with heat recovery of ferrous slag. *3rd International Slag Valorisation Symposium*, Leuven, Belgium. https://journals.sagepub.com

Noh, H. G., et al. (2017). Effective thermal conductivity and diffusivity of containment wall for nuclear power plant OPR1000. *Nuclear Engineering and Technology*. 49(3), 459-65. 10.1016/j.net.2016.10.010

Owczarek, M., et al. (2021). Measurement method of thermal diffusivity of the building wall for summer and winter seasons in Poland. *Energies*, 14(13), 3836. 10.3390/en14133836

Pratticò, D., et al. (2025). Hybrid FEM-AI approach for thermographic monitoring of biomedical electronic devices. *Computers*. 14(9), 344. 10.3390/computers14090344

Taylor, R. E. & Cape, J. A. (1964). Finite pulse time effects in the flasd diffusivity technique. *J. Appl. Phys.* Lett. 5(10), 212-3. 10.1063/1.1723593

Rizzo. E. M. S. (2005). Introdução aos processos siderúrgicos. São Paulo: *Associação Brasileira de Metalurgia e materiais*. 150p. https://pt.scribd.com

Santamaría, A., et al. (2017). Performing self-compacting concrete with electric arc-furnace slag as aggregates. *International Conference on Advances in*

CC BY 4.0 DEED

Sustainable Construction Materials & Civil Engineering Systems (ASCMCES-17). 120, 03003. 10.1051/matecconf/201712003003

Sellami, A., et al. (2022). Study of toughness and thermal properties of bio-composite reinforced with diss fibers for use as an insulating material. *Energy and Buildings*, 276(20), 112527. 10.1016/j.enbuild.2022.112527

Shin, K., et al. (2002). Thermo-physical properties and transient heat transfer of concrete at elevated temperatures. *Nuclear engineering and design*. 212(1-3), 233-41. 10.1016/S0029-5493(01)00487-3

Silva, V. C. (2014). Estudo da viabilidade da utilização da escória de aciaria como matéria prima alternativa em novos produtos. In: 11º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Design, Gramado. São Paulo: *Editora Edgard Blücher*. p. 2114. https://www.proceedings.blucher.com.br

Sun, F., et al. (2025). Over temperature in thermal barrier coating system induced by local spallation of ceramic layer. *Applied Thermal Engineering*. 269(1-2), 126121. 10.1016/j.applthermaleng.2025.126121

Teo, P. T., et al. (2020). Assessment of electric arc furnace (EAF) steel slag waste's recycling options into value added green products: a review. *Metals*. 10(10), 1347. 10.3390/met10101347

Ting, J. C. J., et al. (2025). Revolutionizing concrete: performance enhancement and elemental insights with Electric Arc Furnace (EAF) slag replacement. *Materials*. 18(7), 1528. 10.3390/ma18071528

Tran, Q. H., et al. (2017). Effects of ambient temperature and relative humidity on subsurface defect detection in concrete structures by active thermal imaging. *Sensors*. 17(8), 1718. 10.3390/s17081718

Venegas, P., et al. (2018). Projected thermal diffusivity analysis for thermographic nondestructive inspections. *International Journal of Thermal Sciences*. 124, 251-62. 10.1016/j.ijthermalsci.2017.10.010

Xu, F., et al. (2020). Experimental investigation on the effect of sulfate attack on chloride diffusivity of cracked concrete subjected to composite solution. *Construction and Building Materials*. 237, 117643. 10.1016/j.conbuildmat.2019.117643

Zahrani, F., et al. (2026). Sustainable cement mortar-esparto composites: experimental thermal and mechanical characterization, building energy simulation, and life cycle assessment. *Journal of Building Engineering*. 128, 116725. 10.1016/j.jobe.2026.116725

Wang, C., et al. (2025). Optimized design of contact interfaces for enhanced heat dissipation in flip-chip package. *Applied thermal engineering*. 259, 124936. 10.1016/j.applthermaleng.2024.124936

White, G., et al. (2022). Novel methods for measuring the thermal diffusivity and the thermal conductivity of a lithium-ion battery. *Applied Thermal Engineering*. 212, 118573. 10.1016/j.applthermaleng.2022.118573

You, X., et al. (2026). Utilizing desert sand and industrial by-products for developing cement-free highly thermal conductive, low-cost materials for data center buildings. *Construction and Building Materials*. 534, 146849. 10.1016/j.conbuildmat.2026.146849

CC BY 4.0 DEED