

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS – UFAL

CENTRO DE TECNOLOGIA - CTEC

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Karla Kamila Barros Pinheiro

**ESTUDO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA EM CONCRETO COM
DIFERENTES DENSIDADES**

Maceió-AL

2023

Karla Kamila Barros Pinheiro

**ESTUDO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA EM CONCRETO COM
DIFERENTES DENSIDADES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao colegiado do curso de Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Paulo César Correia Gomes

Coorientador: Prof. Me. Karlisson André Nunes da Silva

Maceió-AL

2023

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecária Responsável: Livia Silva dos Santos CRB - 1670

P654e Pinheiro, Karla Kamila Barros.
Estudo da condutividade térmica em concreto com diferentes densidades / Karla Kamila Barros Pinheiro. – 2023.
56 f.:il.

Orientador: Paulo César Correia Gomes.
Coorientador: Karlisson André Nunes da Silva.
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2023.

Bibliografia: f. 41-44

Apêndice: f. 45-56

1. Condutividade térmica. 2. Concreto - Calor. 3. Concreto - Densidade. I. Título

CDU: 624.012.45

*Dedico este trabalho aos meus pais
José Carlos e Jovaci Barros
Que sempre me incentivaram.*

AGRADECIMENTOS

Profunda gratidão, primeiramente a Deus, por Sua orientação e bênçãos em minha vida. Em segundo lugar, a minha amada família, meus pais José Carlos e Jovaci Barros por todo incentivo e suporte ao longo desses anos, aos meus irmãos José Carlos (Carlinhos) que foi uma inspiração e João Carlos (Joca) por sempre me ouvir e incentivar, e por fim, mas não menos importante, a minha cunhada Atalia (Valéria) que me socorreu com suas ilustrações e sempre estava disposta a ajudar.

Gratidão também aos meus amigos: Andressa por ser minha dupla em absolutamente tudo e me ajudar com todas as dificuldades sempre com seu pensamento positivo; Gabi e Bia por deixar as longas viagens até a UFAL mais leves e divertidas com muitas risadas e sorvetinhos; Bruno por sempre estar disposto a ajudar e com paciência me ensinar os cálculos e mecânicas; Sérgio sempre me ajudando com sua organização de agenda e seu prazer em corrigir textos e formatações; enfim, obrigada pelas amizades sincera, risadas e momentos preciosos compartilhados juntos nesses 5 anos de graduação com muitas lutas e horas de estudos sempre nos incentivamos. Assim como também agradecer aos amigos que mesmo longe do meu cotidiano se fizeram presente torcendo por mim Ana, Jadson, Cris, Aline e Francine.

Quero também expressar minha sincera gratidão ao meu orientador, Professor Paulo, e ao meu coorientador, Professor Karlisson, pelo compromisso e dedicação em me guiar durante esta jornada acadêmica. Suas expertises, orientação e apoio têm sido inestimáveis para o meu crescimento profissional e acadêmico. Sou grata pela oportunidade de aprender com vocês e pela confiança que depositaram em mim.

Sou grata ao Laboratório de Materiais e aos técnicos por toda ajuda e apoio na produção experimental do trabalho. Aos fornecedores dos aditivos para a produção dos concretos que também foram de grande importância para o desenvolvimento da pesquisa, então fica os meus agradecimentos a BASF e a Aditibras. Assim como também sou grata ao grupo de pesquisa MECOEFIGON por todo apoio dado durante a elaboração deste trabalho.

E por fim, mas não menos importante, a todos que fazem parte do grupo PEC (Programa Especial de Capacitação Discente), por toda parceria, capacitações, experiências, encorajamento e oportunidades de crescimento.

RESUMO

O desempenho térmico das edificações vem sendo estudado e aprimorado pelos profissionais da área visando oferecer aos usuários uma melhor experiência. Visto isso, o objetivo do presente trabalho é estudar a capacidade que concretos com diferentes densidades têm de conduzir calor, através de uma determinada espessura, utilizando uma fonte artificial de calor constante. Para isso, foi realizado um ensaio, não normatizado, que consiste em fixar uma distância entre a fonte de calor e a amostra, utilizar um painel de isopor objetivando isolar as outras faces do corpo de prova, aferir as temperaturas regularmente através de uma câmara térmica e um termômetro de haste. Então, com os dados obtidos no ensaio, foi observado o tempo necessário para que os concretos atingissem o regime estacionário e, a partir disso, foi possível efetuar o cálculo do coeficiente de condutividade térmica utilizando a equação de Fourier. Com isso, os resultados mostraram que os concretos com menor densidade apresentaram melhor desempenho térmico quando comparado ao concreto mais denso. Assim, foi possível concluir que a densidade tem influência sobre o tempo em que os concretos alcançam o estado estacionário, conseqüentemente também na condutividade térmica do material.

Palavras chave: condutividade térmica; densidade; concreto leve.

ABSTRACT

The thermal performance of buildings has been studied and improved by professionals in the field in order to offer users a better experience. Given this, the objective of this work is to study the ability of concrete with different densities to conduct heat, through a given thickness, using an artificial source of constant heat. For this, a non-standard test was carried out, which consists of fixing a distance between the heat source and the sample, using a styrofoam panel with the aim of isolating the other faces of the test specimen, measuring the temperatures regularly using a thermal camera. and a rod thermometer. Then, with the data obtained in the test, the time required for the concrete to reach the steady state was observed and, from this, it was possible to calculate the coefficient of thermal conductivity using the Fourier equation. Therefore, the results showed that concrete with lower density had better thermal performance when compared to denser concrete. Thus, it was possible to conclude that the density has influence on the time in which the concrete reaches the steady state, consequently also on the thermal conductivity of the material.

Keywords: thermal conductivity; density; lightweight concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Condução, Convecção e Radiação.	14
Figura 2: Condução de calor de uma face mais energética para menos energética.	14
Figura 3: Convecção forçada (a) e convecção natural (b).	16
Figura 4: Relação entre a densidade e a condutividade térmica.	19
Figura 5: Aparelhagem do ensaio da placa quente.	20
Figura 6: Arranjo do ensaio realizado.	20
Figura 7: Execução do ensaio.	21
Figura 8: Esquema de aquecimento das amostras.	22
Figura 9: Isolamento do corpo de prova contra agentes externos.	22
Figura 10: Configuração do ensaio com uma mufla como fonte de calor.	23
Figura 11: Configuração de ensaio.	23
Figura 12: Arranjo do ensaio para determinação da condutividade térmica.	24
Figura 13: Fluxograma da metodologia.	27
Figura 14: Soprador térmico utilizado na pesquisa.	30
Figura 15: Câmera térmica utilizada no ensaio.	30
Figura 16: Termômetro de haste utilizado no trabalho.	31
Figura 17: Corpos de prova com 10cmx10cmx17cm.	31
Figura 18: Montagem da estrutura para realização do ensaio (a) vista lateral (b) vista posterior.	32
Figura 19: Aparato do ensaio.	34
Figura 20: Resultados obtidos através das amostras do CAA.	35
Figura 21: Resultados obtidos através das amostras do CCE 10%.	36
Figura 22: Resultados obtidos através das amostras do CCE 20%.	37
Figura 23: Condutividade térmica dos concretos x densidade.	39
Figura 24: Condutividade térmica dos concretos x resistência à compressão.	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1:Relação entre densidade e condutividade de materiais.....	18
Tabela 2: Dosagem dos concretos estudados na pesquisa.	28
Tabela 3 Resultado do ensaio de espalhamento do CAA.	33
Tabela 4: Resultado do ensaio de caixa L.....	33
Tabela 5: Resultados do ensaio de resistência à compressão.	34
Tabela 6: Médias dos valores de temperatura e tempo do CAA e valor do Q calculado.....	38
Tabela 7: Valores utilizados para o cálculo da condutividade térmica do concreto celular com 10%.....	38
Tabela 8: Valores utilizados para o cálculo da condutividade térmica do concreto celular com 20%.....	38
Tabela 9: Resultado do ensaio da amostra 1 do CAA.	45
Tabela 10: Resultado do ensaio térmico da amostra 2 do CAA.	46
Tabela 11: Resultado do ensaio térmico da amostra 3 do CAA.	47
Tabela 12: Resultado do ensaio da amostra 1 do CCE 10%.....	48
Tabela 13: Resultado do ensaio térmico da amostra 2 do CCE 10%.	49
Tabela 14: Resultado do ensaio térmico da amostra 3 do CCE 10%.	50
Tabela 15: Resultado do ensaio térmico da amostra 1 do CCE 20%.	51
Tabela 16: Resultado do ensaio térmica da amostra 2 do CCE 20%.....	53
Tabela 17: Resultado do ensaio térmico da amostra 3 do CCE 20%.	55

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
1.1 Considerações Iniciais	10
1.2 Objetivos.....	11
1.3. Justificativa	11
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	13
2.1 Transferência de calor.....	13
2.1.1 Condução	14
2.1.2 Convecção	15
2.1.3 Radiação	16
2.1.4 Emissividade.....	17
2.2 Condutividade térmica.....	17
2.2.1 Ensaios para obtenção da condutividade térmica	19
2.3 Conforto térmico.....	24
3. METODOLOGIA.....	26
3.1 Definição dos concretos com diferentes densidades	27
3.2 Dosagem e produção dos concretos.....	28
3.3 Ensaios no estado fresco.....	29
3.4 Ensaios no estado endurecido.....	29
3.5 Ensaio prático de condutividade térmica utilizando soprador.	30
4. RESULTADOS	33
4.1 Resultado dos ensaios no estado fresco	33
4.2 Resultado dos ensaios no estado endurecido.....	33
5. CONCLUSÃO.....	40
REFERÊNCIAS	41
APÊNDICE – Tabelas dos ensaios de condutividade térmica.....	45

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

O concreto é o material estrutural mais utilizado no mundo (FIGUEIREDO, 2011). Esse material é utilizado amplamente na construção de pontes, edifícios, pavimentos industriais, entre outros (ASADI *et al.* 2018). Em vista disso, faz-se necessário que os sistemas construtivos sejam aprimorados acompanhando o desenvolvimento tecnológico. Tais tecnologias permitem o direcionamento de técnicas de desenvolvimento do processo executivo de projetos e assim definem a logística operacional (CINTRA, 2017).

Então, o surgimento de novas tecnologias possibilitou a melhoria no conforto térmico das edificações buscando melhores níveis de saúde, conforto e desempenho de seus usuários. As pessoas estão cada vez mais criteriosas com o seu conforto e conscientes das questões ambientais. Simultaneamente, as edificações precisam oferecer as melhores condições térmicas, de modo a garantir o conforto ambiental no interior dos edifícios, sejam quais forem as condições climáticas externas (PEDRA, 2011).

Desse modo, os profissionais da engenharia e arquitetura vêm buscando melhorar os seus projetos utilizando novas técnicas para aperfeiçoar o desempenho de suas edificações, visto que o desempenho térmico depende dos materiais utilizados na edificação (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Projetar estruturas energeticamente eficientes requer conhecimentos a respeito da transferência de calor do ambiente externo para o ambiente interno, buscando soluções em utilizar técnicas e materiais diferentes do usual para garantir as condições necessárias para o conforto térmico desejado (SPECHT *et al.* 2010). Com o advento de novos materiais, foi possível aperfeiçoar a forma de execução e de construção das edificações de modo a satisfazer as necessidades e proporcionar o conforto térmico nas construções (PEDRA, 2011).

Assim, aqueles que possuem baixa densidade apresentam benefícios quanto à sua utilização com o objetivo de reduzir a transferência de calor em dada espessura, visto que essa movimentação de energia ocorre dependendo de alguns fatores, entre eles, a densidade do material (KIM *et al.*, 2012).

A quantificação da capacidade que o material tem de conduzir calor denomina-se condutividade térmica. Assim, analisar essa propriedade se torna importante quando se busca redução da transferência de calor do meio externo para o interno (PASSOS *et al.* 2016). Existe

a NBR 15220:2005 que apresenta um método de ensaio, que tem como referência a norma inglesa ISO 8302:1991, chamado *hot box*, para calcular tal propriedade, porém o equipamento utilizado não é encontrado facilmente no mercado e nos laboratórios de pesquisa. Dessa forma, existem trabalhos que buscam encontrar a capacidade de conduzir calor de outras maneiras como por exemplo Almeida (2017), Pedra (2011) e Carvalho *et al.* (2016).

Tendo como base a influência da densidade do material na condutividade térmica, é importante avaliar o comportamento dos materiais ao variar a sua densidade, de modo a analisar a utilização do concreto como estratégia construtiva que contribui para o conforto térmico do ambiente.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

- Avaliar a condutividade térmica de concretos com diferentes densidades.

1.2.2 Objetivo específico

- Estudar uma metodologia de ensaio para avaliar a condutividade térmica do concreto.
- Analisar a importância da condutividade térmica em elementos de concreto.

1.3. Justificativa

Os avanços tecnológicos na construção civil proporcionaram melhores condições energéticas nas edificações, assim como melhor conforto térmico de modo a garantir o bem estar de seus usuários (SPECHT *et al.* 2010). Dessa forma, faz-se necessário a busca por materiais que proporcionem melhor satisfação térmica nas construções.

A capacidade que o material tem de conduzir calor, denominada de condutividade térmica, é um fator que influencia na sensação térmica no ambiente interno da edificação. Dessa maneira, é importante o estudo dessa característica para a utilização de materiais que possuam baixa condutividade térmica e que possam contribuir para o bem estar dos usuários.

A densidade é uma característica dos concretos que influencia diretamente a sua condutividade térmica e conseqüentemente o conforto térmico do ambiente. Desse modo, concretos com diferentes densidades apresentam diferentes comportamentos térmicos (CINTRA, 2017).

O ensaio utilizado nesse trabalho é uma metodologia alternativa ao ensaio *hot box* baseado na norma NBR 15220:2005, cuja aquisição do equipamento para realização do

experimento não é de fácil acesso. Assim, com o surgimento de novos materiais que não estão com seus valores de condutividade térmica tabelados, foram surgindo metodologias alternativas para conhecer essa propriedade importante dos materiais.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

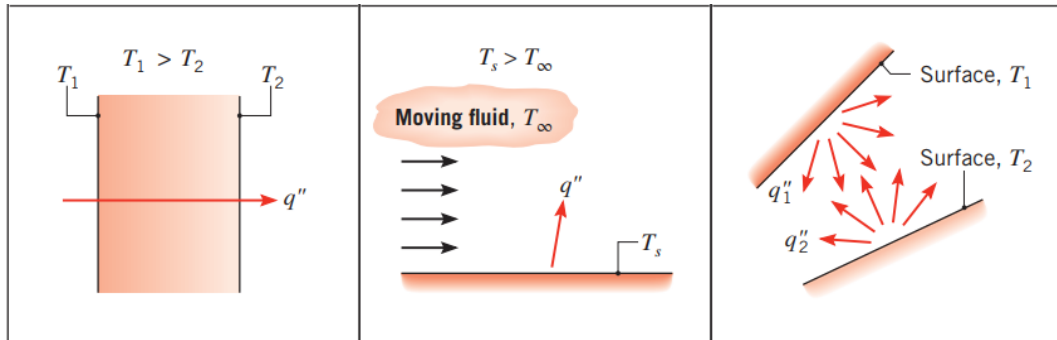
2.1 Transferência de calor

A transferência de calor é um conceito fundamental na engenharia, visto que estuda os mecanismos físicos que descrevem a troca de energia térmica entre corpos ou sistemas em diferentes temperaturas (INCROPERA *et al.*, 2008). Este é um processo natural de uma ampla variedade de situações cotidianas, desde o simples toque em um objeto quente ou frio até a complexa transferência de calor em sistemas industriais (ÇENGEL e GHAJAR, 2020). Assim, entender os princípios e mecanismos deste fenômeno se faz necessário para a otimização de sistemas térmicos, contribuindo para avanços tecnológicos e científicos nas áreas relacionadas.

A transferência de calor e a temperatura têm uma relação próxima, porém elas possuem uma natureza diferente. Ao contrário da temperatura, a transferência de calor tem direção e magnitude, ou seja, é uma grandeza vetorial (ÇENGEL e GHAJAR, 2020). Segundo os autores, o calor é definido como a transferência de energia térmica entre dois sistemas que apresentam temperaturas diferentes. Dessa forma, sempre que houver diferença de temperatura em um meio ou entre meios, ocorrerá transferência de calor.

Existem alguns mecanismos que promovem a transferência de calor como, por exemplo, quando a transferência de calor que ocorre entre um sólido ou fluido, devido a um gradiente de temperatura dá-se o nome de condução. Já quando a passagem de calor advém da diferença de temperatura na ausência de um meio material, denomina-se de radiação. Entretanto, quando a transferência de energia acontece entre uma superfície e um fluido decorrente da diferença de temperatura entre eles, define-se como convecção (INCROPERA *et al.*, 2008; BERGMAN e LAVINE, 2017). Tais modos de transmissão de calor podem ser observados na Figura 1.

Figura 1: Condução, Convecção e Radiação.

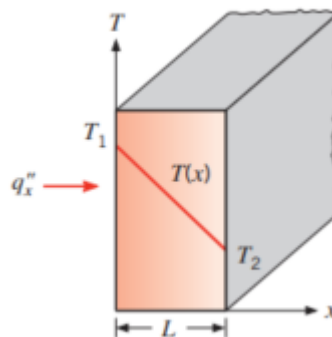


Fonte: Bergman e Lavine, 2017.

2.1.1 Condução

Transferência de energia das partículas mais energéticas para as menos energéticas de uma substância devido interação entre as partículas dá-se o nome de condução, como mostrado na Figura 2, que representa condução em um elemento com diferença de temperatura T_1 e T_2 (BERGMAN e LAVINE, 2017). Esse modo de conduzir calor ocorre devido exclusivamente a um gradiente de temperatura existente no material (COELHO, 2016). Tal fenômeno pode acontecer em sólidos, líquidos ou gases. Em gases e líquidos ocorre em consequência das colisões e difusão das moléculas durante seus movimentos aleatórios. Já em sólidos acontece devido à combinação de vibrações de moléculas em uma rede e o transporte de energia por elétrons livres (ÇENGEL e GHAJAR, 2020).

Figura 2: Condução de calor de uma face mais energética para menos energética.



Fonte: Bergman e Lavine, 2017.

O processo de transferência de calor é quantificado em termos de equações de taxa apropriadas. Assim, as equações são utilizadas para calcular a quantidade de energia sendo transferida por unidade de tempo. Para transferência de calor por condução, a equação de

velocidade amplamente utilizada em elementos sólidos é conhecida como lei de Fourier, descrita na Equação 1 (BERGMAN e LAVINE, 2017).

$$\dot{Q} = \frac{Q}{\Delta t} = k \cdot A \cdot \frac{(T_{se} - T_{si})}{L} \quad \text{Equação 1}$$

Onde, \dot{Q} é o fluxo de calor [W], Q é a quantidade de calor [J], que atravessa a área A [m²], através de uma variação de tempo Δt , k é a condutividade térmica do material [W/m K], L é a espessura [m], T_{se} é a temperatura na face externa [K], T_{si} é a temperatura na face interna [K], então como as temperaturas do ensaio realizado no presente trabalho são dadas em Celsius houve a conversão para realização os cálculos.

Assim, a partir da Equação 1 pode-se isolar a quantidade de calor (Q) como mostrado na Equação 2.

$$Q = \Delta t \cdot k \cdot A \cdot \frac{(T_{se} - T_{si})}{L} \quad \text{Equação 2}$$

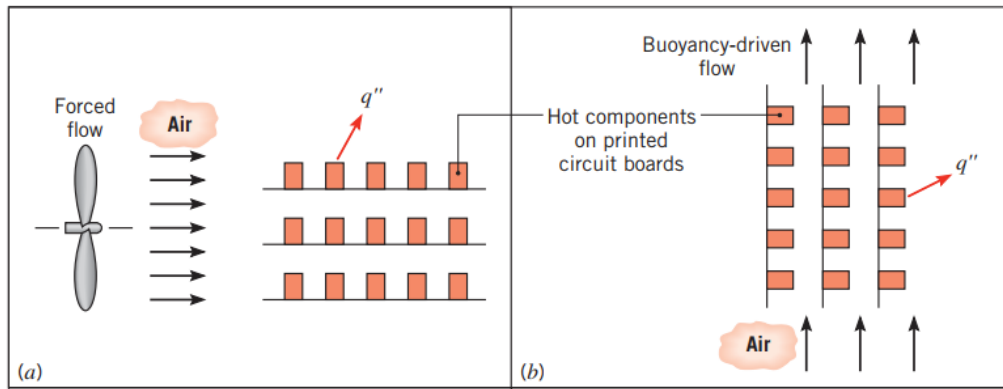
Segundo a NBR 15220 (ABNT, 2005), o coeficiente de condutividade térmica (k) é definido como a propriedade física de um material homogêneo e isotrópico, com um fluxo de calor constante e densidade de 1 W/m^2 , quando submetido a um gradiente de temperatura uniforme de 1 Kelvin por metro.

2.1.2 Convecção

Segundo Çengel (2020), convecção é o modo de transferência de calor entre uma superfície sólida e um líquido ou gás que estão em movimento e que envolve os efeitos combinados de condução e de movimento do fluido. Um exemplo desse fenômeno é a interação entre uma superfície quente e um fluido. Dessa forma, na ausência do movimento a transferência de calor entre os elementos ocorre por pura condução.

Esse modo de transferir calor pode ser classificado de acordo com a natureza do fluxo. Assim, a convecção forçada acontece quando o fluxo é causado por meios externos como, por exemplo, um sistema de ar condicionado, onde um ventilador faz o ar circular em um ambiente, transferindo o calor de uma região para outra. Em contrapartida, a convecção livre ou natural, acontece quando o fluxo é induzido por forças de empuxo, que são devidas a diferenças de densidade causadas por variações de temperatura no fluido como, por exemplo, a transferência de calor por convecção livre que ocorre a partir de componentes quentes em uma matriz vertical de placas de circuito no ar, assim na Figura 3 é possível observar ambas as formas os modos de transferir calor por convecção. (BERGMAN e LAVINE, 2017).

Figura 3: Convecção forçada (a) e convecção natural (b).



Fonte: Bergman e Lavine, 2017.

Esse fenômeno pode ser calculado através da taxa de calor, seja forçada ou natural, de acordo com a Equação 3:

$$q = hA(T_{se} - T_{\infty}) \quad \text{Equação 3}$$

Onde q é a taxa de calor, em W, A é a área da superfície em contato com o fluido através da qual é observada a transferência de calor por convecção, em m^2 , h é o coeficiente médio de transferência de calor por convecção, em $W/(m^2.K)$, na área A , em metros, que usualmente também é denominado coeficiente convectivo, T_s é a temperatura da superfície, em Kelvin, T_{∞} é a temperatura do fluido longe da superfície, em Kelvin.

2.1.3 Radiação

Segundo Bergman e Lavine (2017), a transferência de calor através da radiação ocorre por meio da energia emitida pela matéria, em formas de ondas magnéticas, que está a uma temperatura diferente de zero. Ao contrário da transferência de energia por convecção e condução, a passagem de calor em forma de radiação não requer a presença de um meio interveniente para acontecer (BERGMAN e LAVINE, 2017). Assim, toda radiação que atinge um corpo proveniente de seus arredores é denominada de radiação incidente. Dessa maneira, a radiação térmica está presente em toda matéria sendo emitida como resultado de sua temperatura. Então, é possível detectar esse fenômeno no cotidiano através dos móveis, paredes, solos, prédios, pelo sol, entre outros (INCROPERA *et al.*, 2008).

Esse fluxo de calor pode ser determinado de acordo com a lei Stephan-Boltzman e expresso pela Equação 4:

$$q_{rad} = \sigma T_{sup}^4 \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

q_{rad} é o fluxo de calor por radiação [W/m^2]

σ é a constante de Stefan-Boltzman [$\sigma = 5,6697 \cdot 10^{-8} W / m^2 \cdot K^4$]

T é a temperatura absoluta.

A capacidade de um objeto absorver energia radiante incidente é sempre a mesma que sua capacidade de irradiar sua própria energia na forma de radiação infravermelha conhecida como emissividade (INCROPERA *et al.*, 2008).

2.1.4 Emissividade

Emissividade é uma propriedade radiante da superfície que fornece uma medida da capacidade de emissão de energia de uma superfície em relação a um corpo negro (MORAN *et al.* 2005). Assim, os valores dessa propriedade variam entre 0 e 1, sendo 1 o valor de emissividade para uma superfície que se assemelha a um corpo negro. Um corpo negro absorve toda a radiação que o atinge. Em outras palavras, ele é tanto um absorvedor perfeito quanto um emissor perfeito (PEDRA, 2011).

A emissividade do material é dada pela seguinte Equação 5:

$$q_{rad} = \varepsilon \sigma T_{sup}^4 \quad \text{Equação 5}$$

Onde, ε é a emissividade e q_{rad} é o fluxo de calor por radiação [W/m^2] e σ é a constante de Stefan-Boltzman [$\sigma = 5,6697 \cdot 10^{-8} W / m^2 \cdot K^4$] e T é a temperatura absoluta (MORAN *et al.* 2005).

2.2 Condutividade térmica

A condutividade térmica é a capacidade que o material tem de conduzir calor. Assim, um valor alto para a condutividade térmica indica que o material é um bom condutor de calor e um valor baixo indica que o material é um mau condutor de calor ou isolante. Em geral, bons condutores elétricos também são bons condutores de calor e maus condutores elétricos são maus condutores de calor. (ÇENGEL e GHAJAR, 2020).

Segundo Asadi *et al.* (2018), alguns fatores influenciam diretamente na condutividade térmica do concreto, como por exemplo a temperatura e o teor de umidade, visto que, a água presente no concreto quando submetida a pressão saturada aumenta a condutividade do material. Desse modo, quanto maior a umidade do material maior será o fluxo de calor que ele conduzirá. Em relação a temperatura, a condutividade do concreto diminui à medida que a temperatura aumenta.

Além disso, o tipo de agregado utilizado na produção do concreto também influencia na condutividade do material, pois a substituição dos agregados convencionais por agregados leves diminui a condução de calor devido a sua maior porosidade, por exemplo, a adição de Poliestireno Expandido (EP's) que apresenta densidade variando de 10 a 30 kg/m³, cinzas volantes ou argila expandida (ROSSIGNOLO e AGNESINI, 2005; WOLF, 2008; ASADI *et al.*, 2010). Isso se confirma no estudo de Farias (2021) que comparou alguns concretos com agregados leves e seu efeito na condutividade térmica. Assim, o autor concluiu que com a incorporação de agregados leves na matriz dos concretos acarreta na redução da condutividade térmica. Então a utilização de agregados leves aumenta o isolamento térmico dos concretos, dependendo do percentual utilizado.

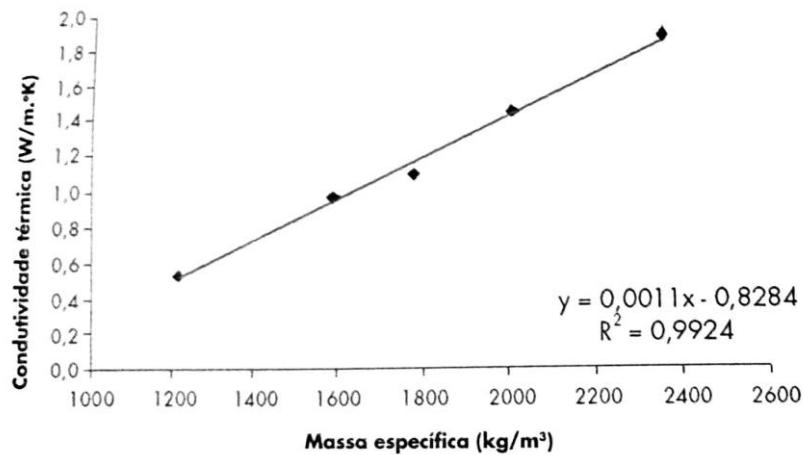
Outro fator que influencia na condutividade térmica do concreto é a densidade. O concreto com ar incorporado apresenta baixa densidade devido ao ar presente em sua composição e essa característica influencia diretamente na condução de calor do material, visto que, quanto menor a densidade, menor a condutividade térmica (SACHT, 2008). Assim, a Tabela 1, descrita na NBR 15220(ABNT, 2005), assim como o gráfico da Figura 4 reafirmam a relação diretamente proporcional da condutividade térmica com a densidade do material.

Tabela 1:Relação entre densidade e condutividade de materiais.

Material	Densidade (kg/m ³)	Condutividade térmica (W/(m.K))
Concreto normal (agregado de pedra)	2200-2400	1,75
Concreto Celular autoclavado (argila expandida)	400-500	0,17
Argamassa comum	1800-2100	1,15
Argamassa celular	600-1000	0,4

Fonte: NBR 15220 (ABNT, 2005).

Figura 4: Relação entre a densidade e a condutividade térmica.



Fonte: Rossignolo, 2009.

Além disso, o tipo de adição mineral que for acrescentada a mistura também influencia na condutividade térmica, pois cinzas volantes ocasionam o aumento da condutividade. Entretanto, outros tipos de adições como, por exemplo, silano ocasiona na diminuição da condutividade térmica (CINTRA, 2017). Resíduos de Beneficiamento de Mármore e Granito (RBMG), muito utilizados em CAA, possuem características que promovem a boa condutividade térmica, já que a composição do mármore e do granito favorece a isso (BARROS FILHO, 2005).

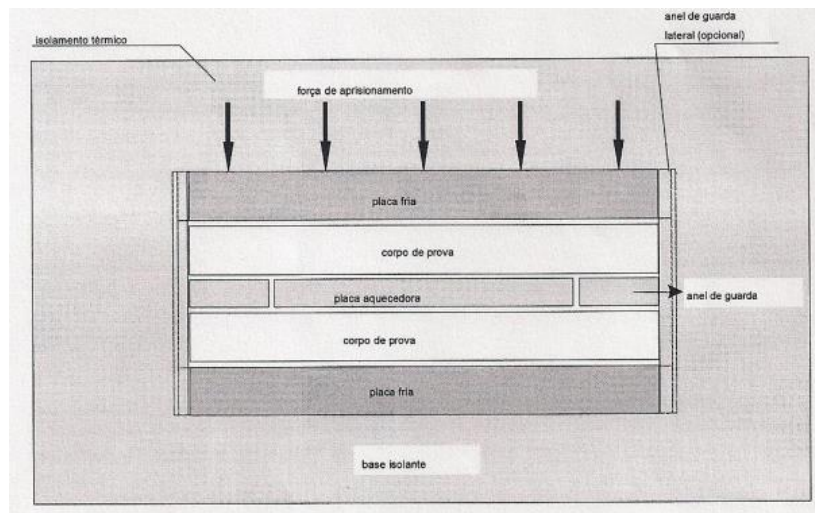
2.2.1 Ensaios para obtenção da condutividade térmica

A condutividade térmica pode ser obtida através de dois métodos sendo o estacionário para materiais homogêneos e que a transferência de calor se dá de forma constante e o transiente para materiais heterogêneos que depende de mudança de umidade, tempo e temperatura (ASADI *et al.*, 2018). À vista disso, o ensaio que utiliza o método prático com auxílio do soprador, ainda não normatizado, segue a linha do ensaio transiente, pois consiste em submeter uma face do corpo de prova a uma fonte de calor e medir a temperatura na face oposta com o passar do tempo. Assim, leva em consideração a umidade e a mudança de temperatura nas duas faces do corpo de prova de um material heterogêneo.

Outros ensaios também medem a capacidade térmica do material como por exemplo a NBR 15220 (ABNT, 2005) descreve um ensaio utilizando uma placa quente protegida, como mostrado na Figura 5, para determinação da resistência térmica e de condutividade térmica de materiais sólidos ou granulares. Esse ensaio é formado por duas seções de aquecimento

independentes, sendo uma central e outra externa. Além disso, um anel de guarda lateral é usado para reduzir as perdas de calor pelas laterais e o ensaio conta também com sensores de temperatura instalados aferem a temperatura no centro e comparam com a seção externa para que o fluxo seja considerado unidimensional as temperaturas precisam ser iguais. Entretanto, o equipamento desse ensaio não é encontrado facilmente nos laboratórios e por isso os pesquisadores utilizam outros métodos para obter a condutividade térmica dos materiais.

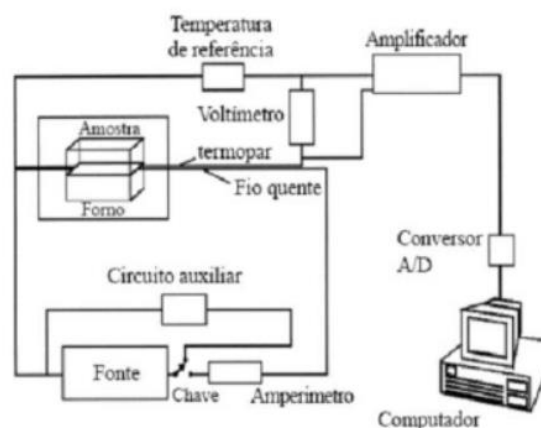
Figura 5: Aparelhagem do ensaio da placa quente.



Fonte: NBR 15220 (ABNT, 2005).

Sacht *et al.* (2010) utilizaram outro método para avaliar a capacidade térmica de concretos leves com argila expandida. Esse método é chamado de fio quente paralelo, normatizado em 1978 pela DIN 51046, tal ensaio consiste em calcular a condutividade térmica através do gradiente de temperatura gerado por uma fonte de calor, infinitamente longa e fina, num meio material de dimensões finitas. A Figura 6 apresenta o diagrama do ensaio realizado.

Figura 6: Arranjo do ensaio realizado.

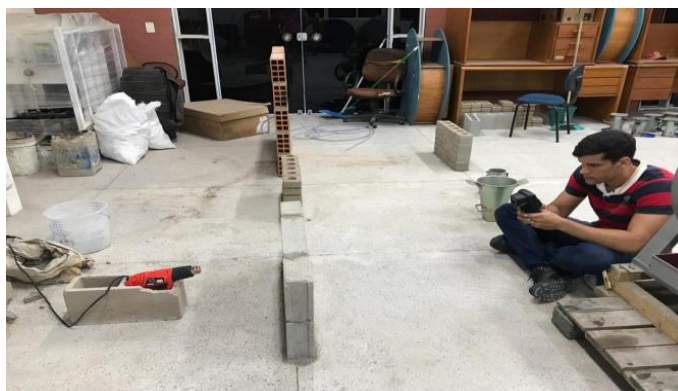


Fonte: Sacht *et al.* (2010).

O dispositivo de fio quente paralelo possui dois fios, um fio quente (resistor Khantal DS) e o outro um termopar tipo K (alumel cromado) a 1,6 cm do centro. A corrente contínua é passada através do fio de aquecimento para medir a condutividade térmica do material, e um termopar é usado para verificar a inclinação aproximadamente uma vez a cada segundo (SACHT *et al.*, 2010).

Por outro lado, Romão (2019), estudou a possibilidade de analisar o desempenho térmico de painéis de alvenaria, compostos por materiais ecológicos de origens distintas, utilizando o método prático com auxílio de um soprador de calor. Com isso, foi obtida a transferência de calor a cada minuto, utilizando uma câmera térmica, no lado oposto à fonte de calor, como mostrado na Figura 7. Dessa forma, é interessante verificar a capacidade do material de transmitir calor entre suas faces para que o conforto dos usuários seja garantido.

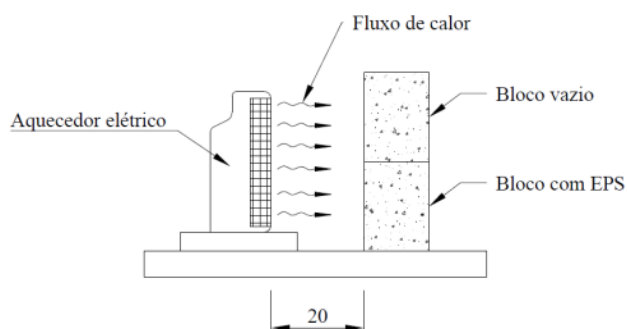
Figura 7: Execução do ensaio.



Fonte: Romão, 2019.

Já Pedra (2011), estudou a condução de calor, tanto de modo natural, ou seja, expondo ao sol quanto com uma fonte de calor artificial. Assim, analisou dois tipos de blocos, cerâmicos e de concreto, uma parte preenchida com EPS e outra parte convencionalmente. A autora utilizou como fonte de calor artificial um aquecedor térmico a 20 cm da parede estudada, como mostrado na Figura 8. Além disso, para capturar a temperatura fez o uso de uma câmera térmica voltada para a face oposta à emissão de calor. Dessa forma, a autora observou os materiais buscando verificar a eficiência térmica da cerâmica e do concreto, tanto com o auxílio do EPS quanto sem.

Figura 8: Esquema de aquecimento das amostras.



Fonte: Pedra, 2011.

Segundo Carvalho *et al.* (2016), a utilização de blocos cerâmicos preenchidos em seus vazios com perlita expandida e vermiculita são mais adequados a isolantes térmicos quando comparados com argila expandida e EPS. Os autores ensaiaram as amostras utilizando um aquecedor térmico a uma distância de 15 cm do bloco, que estava isolado por EPS para evitar interferências externas, como mostrado na Figura 9. Além disso, para captar a temperatura da face oposta à fonte de calor foi utilizada uma câmera térmica. Os autores definiram o tempo de exposição ao calor de 69 minutos e mediram a temperatura a cada 3 minutos.

Figura 9: Isolamento do corpo de prova contra agentes externos.

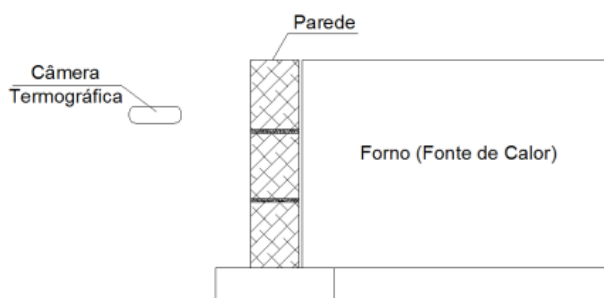


Fonte: Carvalho *et al.*, 2016.

Por outro lado, Almeida (2017) fez uma análise térmica em alvenarias estruturais, utilizando argamassas com adições de pó de borracha, areia de PET e pérolas de EPS. Assim, o autor retirou a porta de uma mufla e a utilizou como fonte de calor, como mostrado na Figura 10, também fez o uso de uma câmera termográfica, a uma distância de 2,1 m da parede, para realizar as medições de temperatura, na face oposta à fonte de calor a alvenaria permaneceu em exposição ao calor durante 4 horas e as fotos térmicas foram registradas a cada 30 minutos. Além do tempo de aquecimento, o autor também verificou por mais 4 horas. Então, foi

observado que a alvenaria preenchida com argamassa com adição de pó de borracha foi a mais eficiente entre as estudadas quanto ao conforto térmico oferecido.

Figura 10: Configuração do ensaio com uma mufla como fonte de calor.



Fonte: Almeida, 2017.

Vieira (2021) estudou a condutividade térmica em paredes compostas por diferentes materiais sendo eles: bloco de concreto, tijolos ecológicos e sanduíche com núcleo de EPS. Para esse estudo a autora utilizou um soprador térmico como fonte de calor a uma distância de 40 cm do corpo de prova, assim como fez o uso de uma câmera térmica na face oposta à fonte de calor a uma distância de 1,5 m da amostra, como mostra a Figura 11. A parede ficou exposta ao calor por 23 minutos e as verificações de temperatura foram feitas a cada um minuto. Assim, a autora concluiu que a vedação que fez o uso do EPS foi mais benéfica para o conforto térmico do ambiente.

Figura 11: Configuração de ensaio.

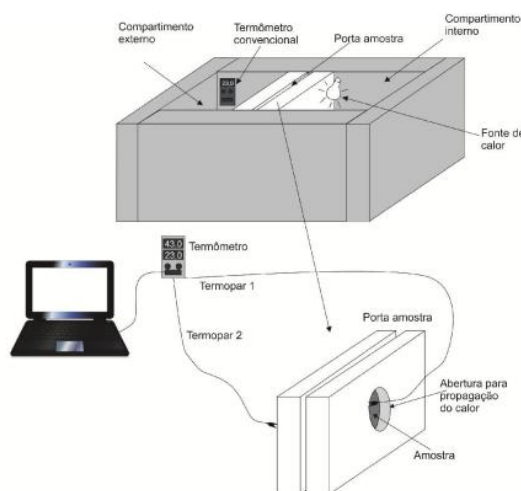


Fonte: Vieira, 2021.

Já Oliveira *et al.* (2015), determinaram o coeficiente de condutividade térmica em compósitos constituídos a partir da fibra de coco através do arranjo do ensaio mostrado na Figura 12. Esse ensaio consiste em analisar uma amostra rodeada de madeira com espessura de 45 cm para evitar perda de calor para o ambiente. A fonte de calor utilizada é uma lâmpada

incandescente e aferido a temperatura nas faces internas e externas do corpo de prova. Assim, com auxílio de um software as temperaturas eram captadas a cada minuto e armazenadas.

Figura 12: Arranjo do ensaio para determinação da condutividade térmica.



Fonte: Oliveira *et al.*, 2015.

2.3 Conforto térmico

O conforto térmico está relacionado ao sentimento de satisfação dos seres com relação ao ambiente em que estão vivendo. Dessa forma, se o balanço térmico de todas as trocas de calor a que o corpo está submetido for nulo e a temperatura da pele e suor estiverem dentro dos limites, é possível afirmar que o homem se encontra confortável termicamente (LAMBERTS *et al.*, 1997).

O balanço térmico das trocas de calor é influenciado por fatores naturais e humanos como, por exemplo, atividades físicas, vestimenta, temperatura do ar, temperatura radiante, velocidade do ar e umidade do ar (LAMBERTS *et al.*, 1997). Esses fatores interferem diretamente na vida dos seus usuários, pois temperaturas moderadas e variações mais acentuadas podem prejudicar a saúde, segurança e produtividade das pessoas (DIAS, 2013).

Dessa maneira, conforto térmico é um dos principais requisitos ambientais para proporcionar o mais alto nível de habitabilidade, e sua importância não está relacionada apenas ao conforto do usuário, mas também ao desempenho no trabalho, na vida e na saúde (ANGELIN, 2014).

Os requisitos humanos de conforto térmico e o conhecimento do clima associados às propriedades térmicas dos materiais, assim como o projeto arquitetônico adequado ao clima específico fornecem condições às edificações e espaços urbanos cuja resposta térmica satisfaça os requisitos de conforto térmico. Além do conforto térmico adequado, esses fatores que

contribuem para o projeto arquitetônico também oferecem estratégias utilizadas para reduzir o consumo de energia, incluindo o uso de componentes com inércia térmica (PEDRA, 2011).

A inércia térmica está relacionada à atenuação e retardos das ondas de calor ou resfriamento de materiais. Essa propriedade depende das características térmicas dos materiais construtivos utilizados, sendo função da densidade, condutividade térmica e da capacidade calorífica das vedações (ANGELIN, 2014).

Dessa forma, os profissionais da engenharia e da arquitetura adequam suas edificações de acordo com as variações climáticas da região, justamente para suavizar as sensações de desconforto causadas por questões naturais como, por exemplo, excesso de calor, frio e ventos (FROTA e SCHIFFER, 2001). Assim, o isolamento térmico das edificações é importante para que os profissionais ofereçam aos seus clientes um ambiente confortável termicamente.

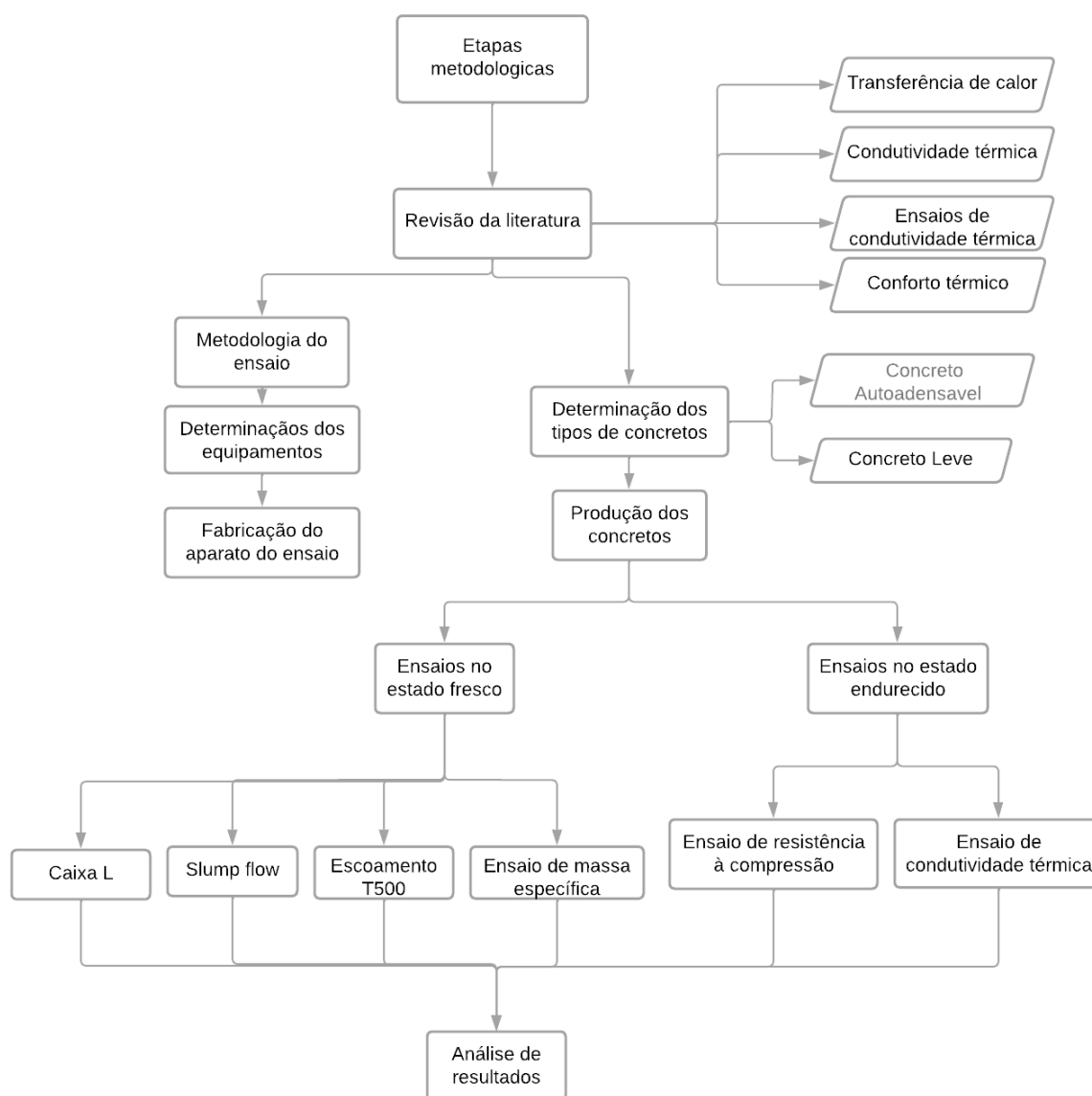
3. METODOLOGIA

Para o estudo proposto em atendimento ao objetivo do trabalho, foram desenvolvidos três tipos de concreto com diferentes densidades, sendo eles: o concreto autoadensável, concreto celular espumoso com 10% de espuma e outro com 20% de espuma. Posteriormente, para avaliar a capacidade de conduzir calor foi escolhido um método de ensaio, não normatizado, baseado em trabalhos acadêmicos anteriores e fundamentado em informações científicas da literatura.

Uma vez definido o ensaio, foi proposto um aparato para sua realização levando em consideração o isolamento do corpo de prova e foram escolhidos os equipamentos a serem utilizados no ensaio. Assim, o experimento para obtenção da condutividade térmica foi realizado com auxílio de um soprador térmico, escolhido como fonte de calor, uma câmara térmica, um termômetro de haste e um cronômetro. Com isso, é possível submeter o concreto a uma fonte de calor constante até que as temperaturas se estabilizem em suas faces paralelas, ou seja, atinja o regime estacionário, aferindo a temperatura em ambas as faces do corpo de prova de 5 em 5 minutos. Dessa maneira, observa-se a capacidade que o material tem de conduzir calor entre suas faces.

Além do ensaio térmico, também foi realizado ensaio no estado endurecido de resistência à compressão. Já no estado fresco, foi realizado ensaio de densidade para todos os concretos. Além disso, para o autoadensável, foi observado sua capacidade passante e de espalhamento através dos ensaios de caixa L, *slump flow* e escoamento T500. Assim, toda a metodologia de ensaio pode ser observada no fluxograma mostrado na Figura 13.

Figura 13: Fluxograma da metodologia.



Fonte: Autora, 2023.

3.1 Definição dos concretos com diferentes densidades

Foram escolhidos dois tipos de concretos, concreto autoadensável (CAA) e concreto celular espumoso (CCE), que apresentam características bem distintas, principalmente sua densidade. Assim, é possível estudar a capacidade que cada material tem de conduzir calor e proporcionar o melhor desempenho térmico para seus usuários.

Todos os concretos foram produzidos com cimento CP V, areia média natural e superplastificante. Além desses materiais para o CAA foi escolhido utilizar pedra britada com dimensão máxima de 12mm e Resíduos de Mármore e Granito (RBMG). Já para o CCE foi utilizado aditivo modificador de viscosidade e aditivo incorporador de ar. A escolha dos

materiais e dosagem dos concretos foram definidas por estudos anteriores do grupo de pesquisa MECOEFIGON.

Então, com o objetivo de ter mais variedade na densidade do material, o concreto celular será dosado de duas formas, uma com 10% de espuma (CCE 10%) e outra com 20% de espuma (CCE 20%). Assim, o estudo contempla três variações de densidades.

3.2 Dosagem e produção dos concretos

A dosagem dos concretos está apresentada na Tabela 2: Dosagem dos concretos estudados na pesquisa. e seguiu os trabalhos anteriores do grupo de pesquisa MECOEFIGON.

Tabela 2: Dosagem dos concretos estudados na pesquisa.

Volume de concreto (m ³)	Item	Unid.	CAA	CCE 10%	CCE 20%
1	Cimento	kg	409,30	673,41	598,41
	Ag. miúdo natural	kg	764,30	1009,71	897,20
	Ag. graúdo natural	kg	764,30	-	-
	Água	kg	184,20	256,29	225,10
	Superplastificante	kg	6,10	3,14	2,97
	Ad. Modificador de viscosidade	kg	-	4,52	9,04
	Espuma	l	-	100,00	200,00
	Água/Cimento	-	0,45	0,38	0,38

Fonte: Autora, 2023.

A produção dos concretos, assim como a dosagem, foi realizada de acordo com estudos anteriores do grupo de pesquisa, o concreto autoadensável foi produzido no Laboratório de Materiais (LEMA) da Universidade Federal de Alagoas, utilizando uma betoneira de 400 L. Assim, o modo de produção segue a sequência:

1. Umedecer a betoneira;
2. Agregados miúdos e graúdos, misturados por 30 segundos;
3. Água de absorção, misturada por um minuto;
4. Resíduo de beneficiamento de mármore, mistura por 30 segundos;
5. Cimento, mistura por 30 segundos;
6. 80% de água de mistura, mistura por dois minutos;
7. Pausa para limpeza da betoneira por um minuto;
8. 20% de mistura e superplastificante, mistura por dois minutos.

Já a produção do concreto com ar incorporado foi realizada utilizando uma argamassadeira com capacidade de 50L que possui 2 velocidades. O passo a passo para produção foi seguindo as seguintes etapas:

1. Umidecer a argamassadeira;
2. Água e o cimento, deixando os materiais descansar por 30 segundos e em seguida misturar na velocidade 1 por 30 segundos;
3. Realizar a limpeza da argamassadeira por 30 segundos, em seguida deixar o material descansar por 30 segundos, após o descanso misturar na velocidade 2 por 1 minuto;
4. Adicionar o superplastificante durante 30 segundos em seguida misturar na velocidade 1 por 30 segundos, logo após mudar para velocidade 2 e misturar por 1 minuto e 30 segundos;
5. Adicionar o aditivo modificador de viscosidade e misturar na velocidade 1 por 2 minutos;
6. Em paralelo a etapa 5 é iniciada a geração de espuma;
7. Adicionar areia e misturar na velocidade 1 por 2 minutos; adicionar a espuma e misturar na velocidade 1 por 2 minutos.

3.3 Ensaio no estado fresco

A caracterização da autoadensabilidade para o CAA foi verificada através do ensaio de espalhamento e o tempo de escoamento de acordo com a NBR 15823-2 (ABNT, 2017), a habilidade passante foi aferida no ensaio da caixa L em concordância com a norma NBR 15823-4 (ABNT, 2017). A massa específica e o teor de ar incorporado foram analisados tanto no concreto autoadensável quanto no concreto celular em conformidade com a NBR 9833 (ABNT, 2008).

3.4 Ensaio no estado endurecido

A resistência à compressão de ambos os concretos foi determinada em conformidade com a NBR 5739 (ABNT, 2018), utilizando corpo de prova cúbico com dimensão de 10cmx10cmx10cm, apesar de ter essa forma geométrica segue a velocidade de carregamento da norma para amostras cilíndricas. A condutividade térmica dos concretos foi determinada através do método prático com auxílio do soprador térmico, ensaio não normatizado, que consegue medir a capacidade que material tem de conduzir calor em uma determinada espessura, utilizando corpo de prova com 10cmx10cmx17cm.

3.5 Ensaio prático de condutividade térmica utilizando soprador.

3.5.1 Equipamentos utilizados no ensaio

Foi utilizado um soprador térmico, ilustrado na Figura 14, no 2º estágio com potência de 1000W, temperatura de 350°C e com fluxo de ar de 300 litros/min.

Figura 14: Soprador térmico utilizado na pesquisa.



Fonte: Autora, 2023.

A câmera térmica utilizada foi da marca Testo, modelo UES06WZ-XXXYYYSIPA, mostrada na Figura 15.

Figura 15: Câmera térmica utilizada no ensaio.



Fonte: Autora, 2023.

Além disso, para o controle do tempo durante o ensaio foi utilizado um cronometro e também um termômetro de haste com faixa de temperatura entre -50°C e +300°C, precisão de ± 1 e display digital, como mostrado na Figura 16.

Figura 16: Termômetro de haste utilizado no trabalho.

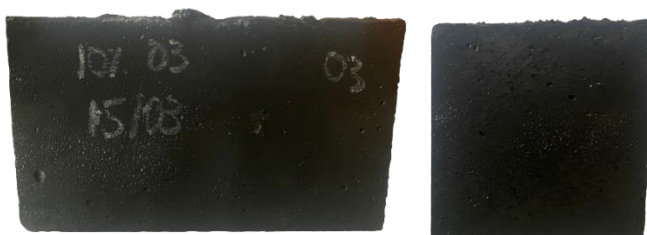


Fonte: Autora, 2023.

3.5.2 Metodologia do ensaio

O ensaio consiste em utilizar uma fonte de calor, soprador térmico, a uma distância 30 cm do corpo de prova em formato de paralelepípedo pintado de preto de dimensões 10cmx10cmx17cm, como mostrado na Figura 17, aquecendo-o até que a temperatura em sua face oposta à fonte de calor se estabilize. Além disso, a amostra foi pintada com tinta preta, a fim de que a emissividade seja nula.

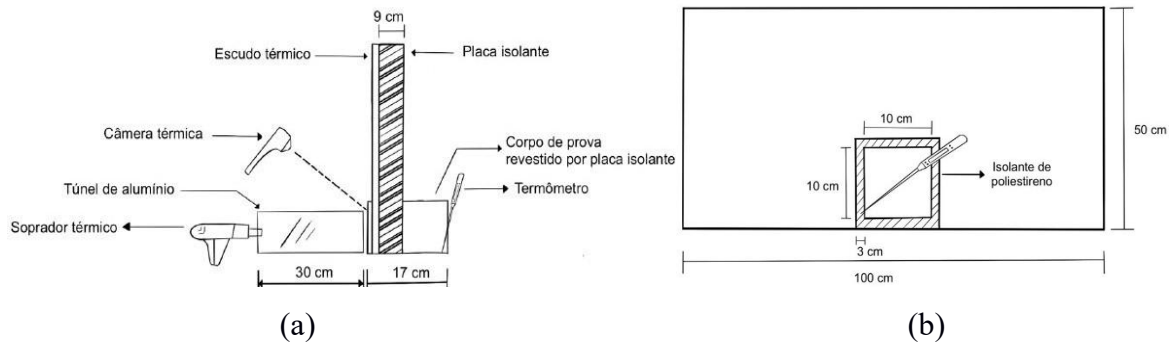
Figura 17: Corpos de prova com 10cmx10cmx17cm.



Fonte: Autora, 2023.

A estrutura utilizada para isolar o corpo de prova e evitar a influência de fatores externos é composta por 3 placas de EPS com 100cmx50cm coladas, que juntas apresentam espessura de 9 cm, revestidas por um escudo térmico formado por caixas tetrapak, proveniente de material reciclado, com sua face revestida por alumínio voltada para a fonte de calor. Ademais, para direcionar o calor, posiciona-se um túnel de zinco, como mostrado na Figura 18. Essa metodologia difere de outras, visto que leva em consideração um escudo térmico maior visando proteger as outras faces do corpo de prova da influência da fonte de calor.

Figura 18: Montagem da estrutura para realização do ensaio (a) vista lateral (b) vista posterior.



Fonte: Autora, 2023.

A temperatura do corpo de prova é aferida em dois pontos: a face que está recebendo o calor diretamente é monitorada a cada 5 minutos por uma câmera térmica e a face oposta à fonte de calor, por um termômetro de haste aderido ao corpo de prova.

Assim, o objetivo do ensaio é verificar a capacidade que o material tem de conduzir o calor através de uma determinada espessura e tempo de exposição, observado pela diferença de temperatura entre a face que recebe o calor e a face oposta.

3.5.3 Cálculo da condutividade térmica

Para realização dos cálculos, inicialmente foi realizada a conversão de unidade de graus Celsius para Kelvin através da Equação 6.

$$T_{Kelvin} = T_{Celsius} + 273 \quad \text{Equação 6}$$

Logo depois, foi definido para o CAA o valor do coeficiente de condutividade térmica k , sendo $1,75(W/(m.K))$, em concordância com a NBR 15220 (ABNT, 2005) que classifica o coeficiente de condutividade térmica de concretos convencionais, assim foi adotado esse valor para o CAA, visto que esse concreto é composto por agregados miúdos e grãos convencionais. A partir disso, foram substituídos os valores de k adotado e (ΔT) , (Δt) , área da superfície (A) e comprimento do corpo de prova (L), obtidos através do ensaio do CAA, na Equação 2.

Assim, foi obtido o valor do calor (Q) e mantido como referência para o cálculo da condutividade térmica dos demais concretos ensaiados. Então, foi utilizada a mesma Equação 1, agora com o valor de Q encontrado anteriormente e utilizando os valores de (ΔT) , (Δt) , A e L do CCE 10% e do CCE 20%, para encontrar suas respectivas condutividades térmicas (k).

4. RESULTADOS

4.1 Resultado dos ensaios no estado fresco

Inicialmente, foi realizada a produção do concreto autoadensável e o teste de espalhamento, que classificou o concreto como SF2 com base nos resultados expostos na Tabela 3. Já na Tabela 4 pode ser analisado o resultado do ensaio que avalia a capacidade passante do CAA, caixa L, com resultado $\geq 0,8$ e se enquadrando em PL2. O ensaio de escoamento apresentou tempo de 9,47 segundos se classificando como VS2. O ensaio que avalia a densidade dos concretos no estado fresco foi realizado para todos os concretos e apresentou como resultado 2361,00 kg/m³ para o CAA, 1710,00 kg/m³ para o CCE 10% e 1452,00 kg/m³ para o CCE 20%.

Tabela 3 Resultado do ensaio de espalhamento do CAA.

Espalhamento (mm)		
Medida 1	Medida 2	Medida 3
640	750	722
Média		704
SF2		

Fonte: Autora, 2023.

Tabela 4: Resultado do ensaio de caixa L.

Caixa L			
H1		H2	
60	60	15	15
50	50	6	6
10	10	9	9
10		9	
0,9			
PL2			

Fonte: Autora, 2023.

4.2 Resultado dos ensaios no estado endurecido

Foram moldados 3 corpos de prova, com dimensões de 10cmx10cmx10cm, para o ensaio de resistência à compressão para todos os concretos produzidos, os resultados são apresentados na Tabela 5. Desse modo, a média da resistência à compressão obtida no CAA produzido foi de 47,08 MPa, 26,05 MPa para o CCE 10% e 18,21 MPa para o CCE 20%. Assim, quanto maior a quantidade de espuma menor é a resistência apresenta pelos concretos.

Tabela 5: Resultados do ensaio de resistência à compressão.

CP's (10x10x10)	CAA	CCE 10%	CCE 20%
	fc (MPa)	fc (MPa)	fc (MPa)
1	47,64	26,67	18,09
2	47,59	25,69	17,85
3	46,01	25,79	18,71
Média	47,08	26,05	18,21
Desvio padrão	0,93	0,54	0,44

Fonte: Autora, 2023.

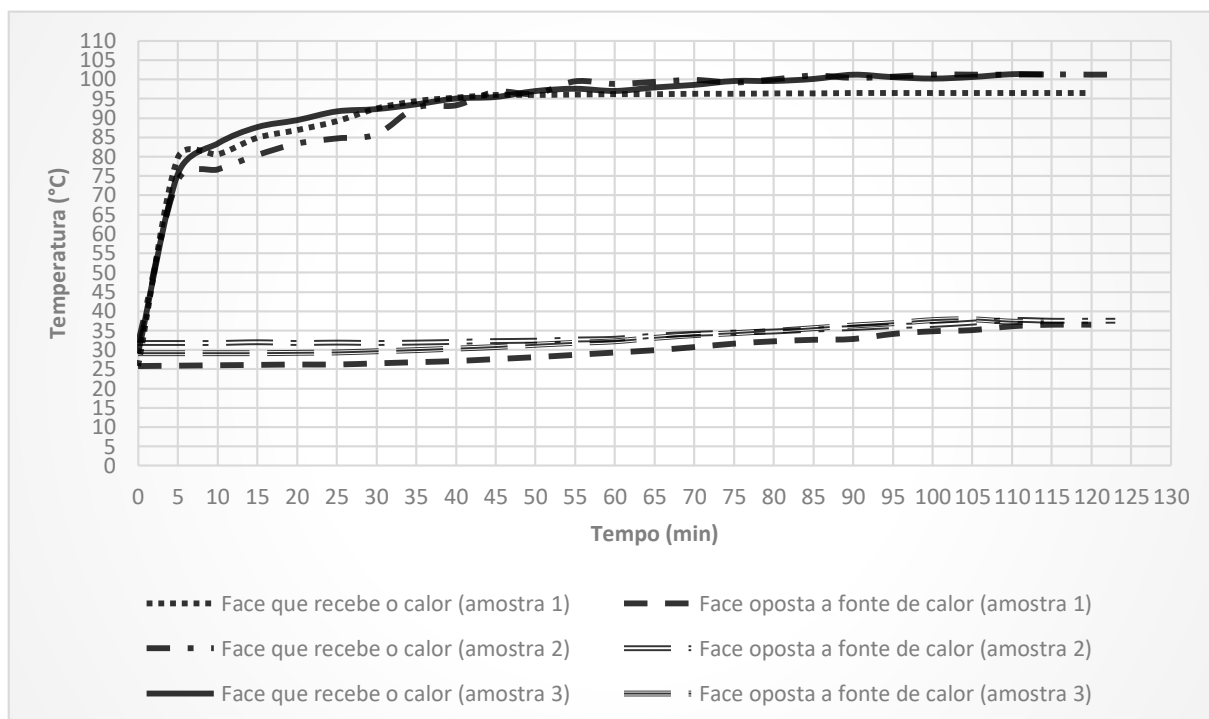
Para o ensaio de condutividade térmica foram moldados três corpos de prova de dimensões 10cmx10x17cm. O aparato montado para realização o ensaio esta mostrado na Figura 19. Inicialmente foram ensaiadas as amostras do CAA e ao iniciar o ensaio foi verificado a temperatura ambiente e a do corpo de prova e depois a cada cinco minutos a temperatura foi aferida em ambas as faces da amostra, como mostrado na Figura 20. A temperatura ambiente no dia ensaio para a primeira amostra foi de 27,2°C, para a segunda amostra foi de 30,8°C e para a terceira amostra foi de 32°C.

Figura 19: Aparato do ensaio.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 20: Resultados obtidos através das amostras do CAA.



Fonte: Autora, 2023.

Na Figura 20 é possível observar que a face que recebe o calor apresenta uma variação de temperatura de 70,7°C, 69,43°C e 71,46.°C para as amostras 1, 2 e 3 respectivamente. Enquanto a face oposta à fonte de calor apresenta a maior variação de temperatura de 10,7°C para amostra 1, 6°C para amostra 2 e 8,8°C para a amostra 3. Além disso, é possível verificar que a temperatura se estabilizou na face oposta a fonte de calor com 2 horas de ensaio para todas as amostras do CAA, ou seja, o material transferiu calor de uma face para outra durante esse período de tempo. Já a face que recebe calor com aproximadamente 1 hora de ensaio já estava estabilizada.

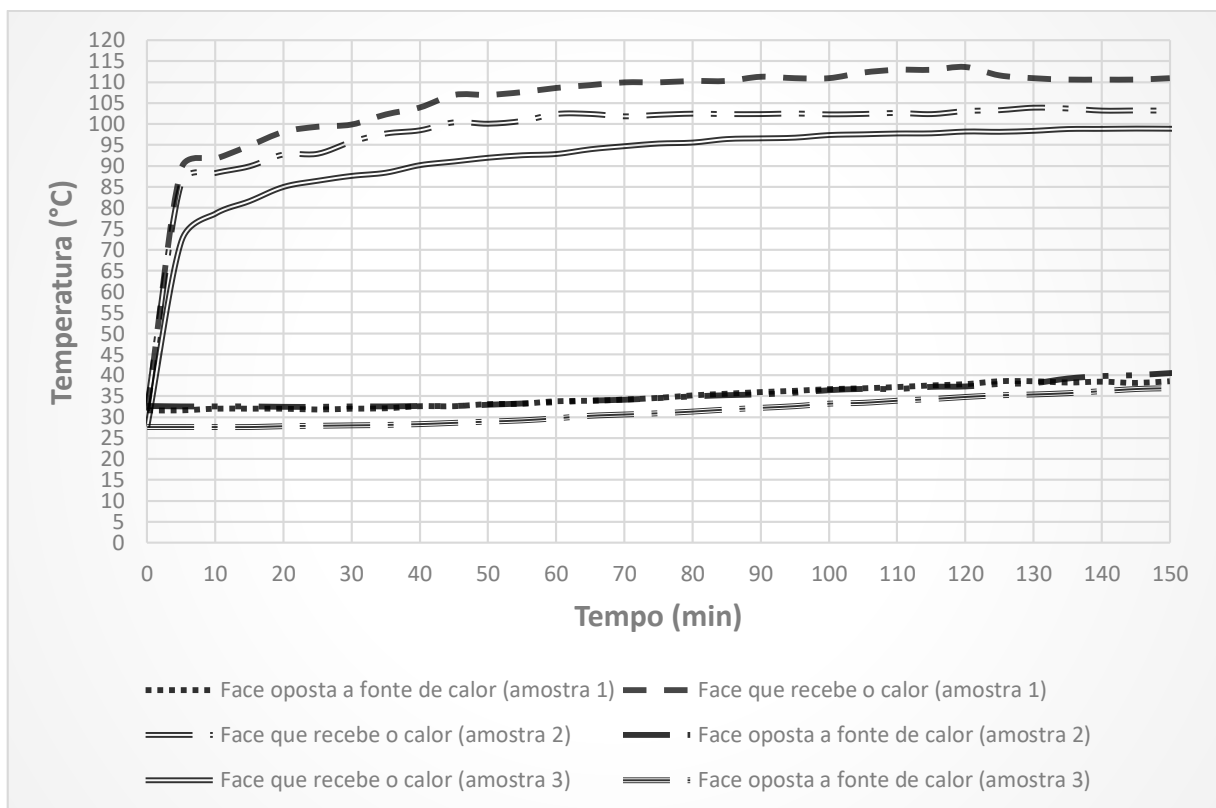
Então, com tais resultados é possível visualizar que as amostras de CAA se comportam de forma semelhante, já que apresentam variações de temperatura próximas do início do experimento até o final para todas as amostras. Também é possível observar que recebendo próximo à 100°C de temperatura em uma face as amostras com concreto autoadensável conduziram para a face oposta aproximadamente 40°C.

Como realizado com o CAA, também foram moldados 3 corpos de prova para cada concreto leve com adição de espuma de 10% e 20%. Então as amostras foram expostas a mesma fonte de calor e verificado sua temperatura nas duas faces no mesmo período de tempo. Assim, os resultados do ensaio para o concreto leve com 10% de espuma podem ser visualizados no

gráfico da Figura 21. Desse modo, foi aferida a temperatura ambiente no dia do ensaio sendo para a primeira amostra de 33,2°C, para a segunda de 31,9°C e para terceira de 27,8°C.

A partir do gráfico da Figura 21 é possível analisar as variações de temperatura de todas as amostras do CCE 10%, sendo para a face que recebe calor de 79,4°C na primeira amostra, 71,3°C na segunda amostra e 76,07°C na terceira amostra. Já face oposta a fonte de calor apresentou variação de 7°C, 8,8°C e 10,8°C, respectivamente, para as amostras 1, 2 e 3. A transferência de calor de uma face para outra demorou aproximadamente 3 horas para face oposta ao calor se estabilizar, já a face que recebe calor se estabilizou em aproximadamente 2 horas.

Figura 21: Resultados obtidos através das amostras do CCE 10%.



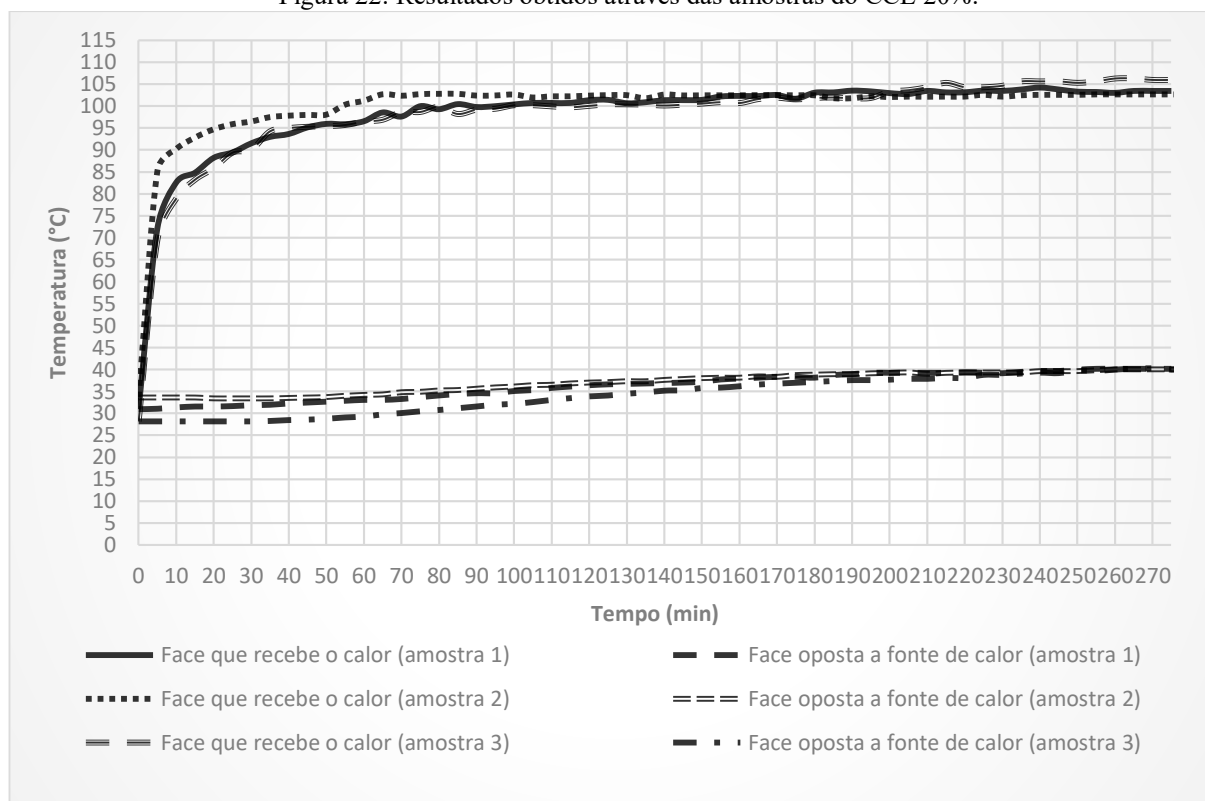
Fonte: Autora, 2023.

Nas 3 amostras de concreto leve com adição de 10% de espuma houve comportamento semelhante quanto a transferência de calor, visto que todas demoraram aproximadamente 3 horas para estabilizar a temperatura na face oposta diferente do CAA que transferiu calor mais rápido em torno de 2 horas.

No concreto leve com adição de 20% de espuma a duração do ensaio foi maior, visto que, a transferência de calor ocorreu mais lentamente quando comparado aos outros concretos, isso

pode ser visualizado no gráfico da Figura 22. A temperatura ambiente no início dos ensaios foi de 31,60°C, 33,60°C e 27,80°C, respectivamente, para primeira, segunda e terceira amostra.

Figura 22: Resultados obtidos através das amostras do CCE 20%.



Fonte: Autora, 2023.

O gráfico da Figura 22 mostra o comportamento térmico das 3 amostras do CCE 20%, onde é possível analisar as variações de temperatura nas faces do corpo de prova, na face que recebe calor foi de 72,5°C para a primeira amostra, 69°C para a segunda amostra e 77,80°C para a terceira amostra. Já na face oposta a fonte de calor a variação para a amostra 1 foi de 9,10°C, para a amostra 2 foi de 6,40°C e para a amostra 3 foi de 12°C. O ensaio durou aproximadamente 4 horas e 30 minutos para a face oposta ao calor se estabilizar. Enquanto que a face que recebe calor consegue estabilizar a partir de 3 horas de ensaio.

O ensaio utilizando o soprador térmico mostra como o material se comporta quando exposto a uma fonte de calor. Assim, foi possível verificar como o concreto absorve energia na face que recebe o calor e quanto tempo o material demora para entrar no regime estacionário, ou seja, a temperatura na face oposta a fonte de calor se estabilizar e assim completar a transferência de calor por uma determinada espessura. Os valores obtidos nos ensaios realizados podem ser analisados de forma mais detalhada no Apêndice do trabalho.

Então, para o cálculo da condutividade térmica, primeiro foram selecionados os valores do ensaio do CAA e obtido o valor da quantidade de calor (Q), como mostrado na Tabela 6. A

quantidade de calor encontrada pode ser comparada com a quantidade que a fonte de calor gera utilizando a mesma variação de tempo, 3750 segundos, e a potência da fonte geradora de 1000W. Dessa forma, foi obtido o Q da fonte geradora de 3.750kJ, ou seja, houve uma perda de calor por convecção entre a fonte geradora e o corpo de prova. Além disso assim, a amostra não consegue absorver todo o calor que é submetida.

Tabela 6: Médias dos valores de temperatura e tempo do CAA e valor do Q calculado.

CAA			
Amostras	Δ temperatura (K)	Δ tempo (min)	Δ tempo (s)
1	120,00	60,00	3600,00
2	123,00	63,67	3820,20
3	114,00	63,83	3829,80
Média	119,00	62,50	3750,00
Q (J)	45937,5		

Fonte: Autora, 2023.

Posteriormente, foi utilizado a quantidade de calor (Q) calculada, e os valores de temperatura e tempo obtidos através dos ensaios para o cálculo da condutividade térmica nos concretos CCE 10% e CCE 20% como mostrado nas Tabela 7 e Tabela 8.

Tabela 7: Valores utilizados para o cálculo da condutividade térmica do concreto celular com 10%.

CCE 10%				
Amostras	Δ temperatura K	Δ tempo	Δ tempo (s)	k 10% (W/(m.K))
1	72,40	150,00	9000,00	1,198
2	62,50	190,00	11400,00	1,096
3	65,27	195,00	11700,00	1,023
Média	66,72	178,33	10700,00	1,106
Desvio padrão				0,09

Fonte: Autora, 2023.

Tabela 8: Valores utilizados para o cálculo da condutividade térmica do concreto celular com 20%.

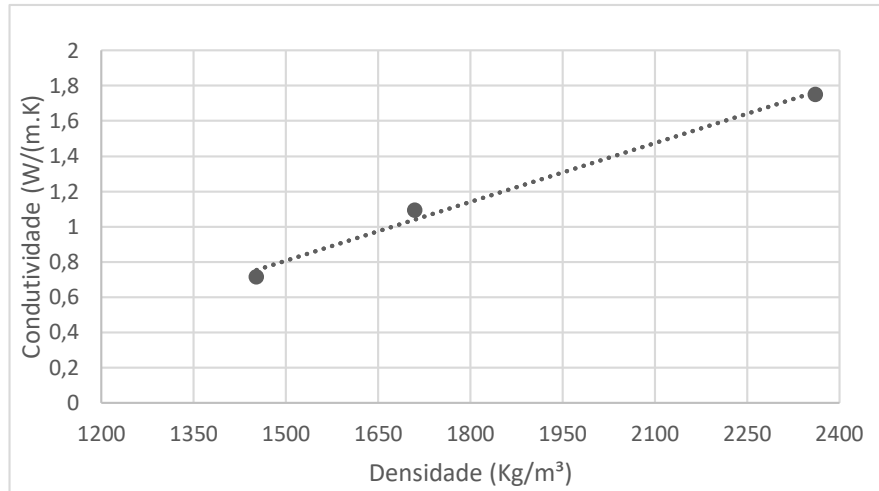
CCEL 20%				
Amostras	Δ temperatura K	Δ tempo	Δ tempo (s)	k 20% (W/(m.K))
1	63,40	275,00	16500	0,747
2	62,50	285,00	17100	0,731
3	65,80	295,00	17700	0,671
Média	63,90	285,00	17100	0,716
Desvio padrão				0,04

Fonte: Autora, 2023.

De posse dos coeficientes de condutividade foi possível comparar os 3 concretos e montar o gráfico da Figura 23 relacionando condutividade x densidade semelhante ao gráfico da Figura 4. Assim, observa-se a relação diretamente proporcional entre a densidade e a condutividade térmica, conforme estudado na literatura. Já no gráfico da Figura 24 é possível

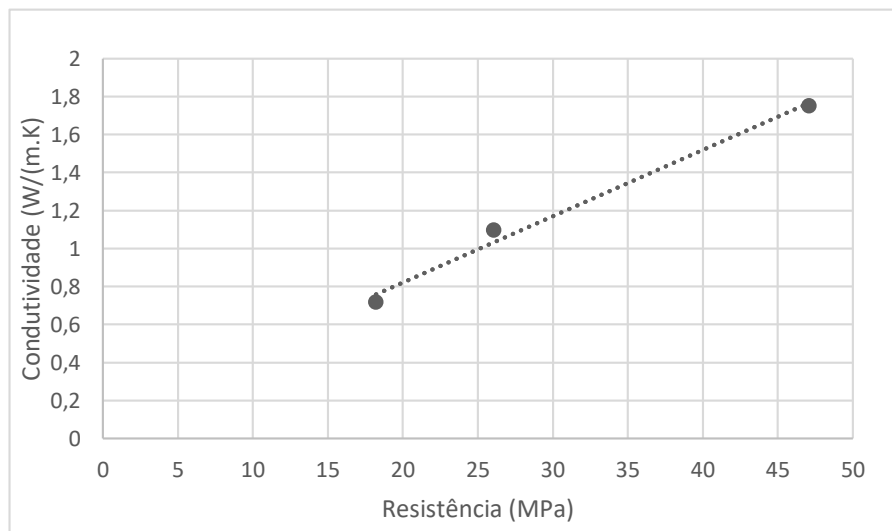
observar a relação entre a resistência dos concretos e a condutividade térmica. Desse modo, os concretos leves, que possuem menor resistência à compressão devido à incorporação de ar, apresentam menor coeficiente de condutividade térmica.

Figura 23: Condutividade térmica dos concretos x densidade.



Fonte: Autora, 2023

Figura 24: Condutividade térmica dos concretos x resistência à compressão.



Fonte: Autora, 2023.

5. CONCLUSÃO

O ensaio estudado no presente trabalho mostrou o comportamento térmico de 3 concretos, que apresentam densidades diferentes, submetidos a uma fonte de calor constante. Desse modo, foi possível verificar a capacidade que os materiais têm de conduzir calor aferindo sua temperatura regularmente até o concreto alcançar o regime estacionário, ou seja, até que sua temperatura entre as duas faces se estabilizasse.

Assim, observando o comportamento dos concretos estudados, é possível concluir que o concreto com maior densidade (CAA), 2361,00 kg/m³, atingiu o seu estado estacionário mais rapidamente, em torno de 2 horas, quando comparado aos demais concretos estudados. O CCE 10% apresentou densidade de 1710,00 kg/m³ e atingiu seu estado estacionário em aproximadamente 3 horas. Já o CCE 20%, com densidade de 1452,00 kg/m³, alcançou o estado estacionário em aproximadamente 4 horas e meia. Desse modo, o experimento mostrou que concretos com ar incorporado apresentam maior resistência térmica à condução de calor, como visto na literatura.

A partir dos valores aferidos no ensaio foi possível calcular o coeficiente de condutividade térmica (k) dos materiais, utilizando a equação de Fourier e o CAA como referência, adotando o seu $k=1,75$ (W/(m.K)), em concordância com a NBR 15220:2005. Então foi calculado, para o concreto celular com 10% de espuma, um k de 1,106 (W/(m.K)) apresentando desvio padrão das 3 amostras de 0,09 e para o com 20%, um k de 0,716 (W/(m.K)) apresentando desvio padrão das 3 amostras de 0,04. Assim, conclui-se que os concretos estudados com menores densidades apresentaram menor capacidade de conduzir calor comparado ao concreto de referência e maior densidade. Dessa maneira, o ensaio se mostrou válido mesmo com suas limitações em relação ao isolamento total do experimento.

Por fim, foi possível analisar que utilizar materiais que apresentam menor densidade colaboram para uma maior resistência térmica, ou seja, dificultam a condução de calor. Dessa forma pode-se afirmar que os concretos leves apresentam melhor desempenho térmico nas edificações, conseqüentemente oferecerem o conforto térmico aos usuários.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, P. S. D. Termografia infravermelha aplicada à análise térmica de alvenaria em blocos cerâmicos estruturais. Monografia. Universidade Federal de Pampa. Alegrete. 2017.

ANGELIN, A. F. Concreto leve estrutural – Desempenhos físicos, térmicos, mecânicos e microestruturais. Limeira, SP. 2014.

ASADI, I. *et al.* Thermal conductivity of concrete – A review. *Journal of Building Engineering*, v. 20, p. 81–93, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 9833: Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 15.220: estabelece Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 15823-2: Concreto autoadensável: Parte 2: Determinação do espalhamento, tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual – Método do cone de Abrams, Rio de Janeiro, 2017b, 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 15823-4: Concreto autoadensável: Parte 4: Determinação da habilidade passante – Métodos da caixa L e da caixa, Rio de Janeiro, 2017.

BARROS FILHO, R. M. Rochas: Mármore e Granito. Basalto e Gabro. Belo Horizonte: Faculdade INAP, 2005.

BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. *Fundamentals of heat and mass transfer*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2017, 8ª edição.

CARVALHO, M; LANDELL, R; GHILARDI, G. F; AMICO, S. C. Análise do desempenho térmico de blocos estruturais cerâmicos preenchidos com materiais leves utilizando termografia. 22º CBRCiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Natal, 2016.

COELHO, J. C. M. Energia e fluidos - Transferência de calor. v3. São Paulo. Edgard Blucher, 2016.

DIAS, A. A. C. Avaliação da percepção da influência do conforto térmico na produtividade. Dissertação (mestrado em engenharia humana). Universidade do Minho. Braga, Portugal. 2013.

CINTRA, L. B. Avaliação das propriedades térmicas de concretos com ar incorporado. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2017.

ÇENGEL, Y. A; GHAJAR, A. J. Heat and mass transfer : fundamentals and applications. 6. ed. New York. NY : McGraw-Hill Education, 2020.

FARIAS, L. N. Estudo sobre o desempenho mecânico e térmico de concretos produzidos com diferentes tipos de agregados leves: uma revisão. *Brazilian Journal of Development*. Curitiba, v 7, n3. 2021.ISSN: 2525-8761, p. 22825-22839.

FIGUEIREDO, A. D. de. Concreto com fibras. In. CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRET-O. p. 1327-1365, 2011.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. Manual de conforto térmico. 5ª ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, Theodore L.; LAVINE, A. S. Fundamentos de Transferência de Calor e Massa. 6ª ed. LTC, 2008

International Organization for Standardization - ISO 8302:1991 Thermal insulation — Determination of steady-state thermal resistance and related properties — Guarded hot plate apparatus

KIM, H. K.; JEON, J. H.; LEE, H. K. Workability, and mechanical, acoustic and thermal properties of lightweight aggregate concrete with a high volume of entrained air. Department of Civil and Environmental Engineering, Korea, South Korea. *Construction and Building Materials*, v.29, p. 193-200, 2012.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F.O.R. Eficiência energética na arquitetura. São Paulo: PW - PROCEL, 1997.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais. 2014.

MORAN, M. J; SHAPIRO, N. H; MUNSON, B. R; DEWITT, D. P. Introdução à Engenharia de Sistemas Térmicos. Editora LTC, 2005.

OLIVEIRA, W. L. *et al.* “Determinação Do Coeficiente De Condutividade Térmica De Compósitos Constituídos A Partir Da Fibra De Coco”. 2015. VI Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. Porto Alegre/ RS.

PASSOS, P. M; CARASEK, H; AMARAL, G. M. Avaliação da capacidade isolante térmica de revestimentos de argamassa. XVI ENTAC- Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. São Paulo. 21 a 23 de set. 2016.

PEDRA, S. A. Potencialidades da termografia infravermelha aplicada ao design do conforto térmico de alvenaria estrutural. Dissertação (Mestrado) - Escola de Design, Programa de Pós-Graduação em Design da Universidade do Estado de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

ROMÃO, E. A. Análise de desempenho térmico em tijolos ecológicos confeccionado com uso de argila expandida. Monografia. Universidade Federal de Alagoas. Delmiro Gouveia, 2019.

ROSSIGNOLO, J. A; AGNESINI, M.V.C. Concreto estrutural leve. In: ISAIA, G. C. (Org.). Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. Vol. 2, p. 1331-1362, 2005.

ROSSIGNOLO, J. A. Concreto leve estrutural, Produção, propriedades, microestruturas e aplicações. São Paulo: PINI, 2009.

SACHT, H. M. Painéis de vedação de concreto moldados in loco: Avaliação de desempenho térmico e desenvolvimento de concretos. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

SACHT, H.M.; ROSSIGNOLO, J.A.; SANTOS. W.N. Avaliação da condutividade térmica em concretos leves com argila expandida. Revista Matéria, v. 15, n. 1, pp. 031 – 039, 2010.

SPECHT, L. P; BORGES, P. A. P; RUPP, R. F; VARNIER, R. Análise da transferência de calor em paredes compostas por diferentes materiais. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 10, n. 4, p 7-18, out./dez. 2010.

VIEIRA, A. P. M. Análise comparativa térmica entre sistemas de vedação constituídos por paredes sanduíche em concreto com núcleo de EPS, alvenaria de vedação de blocos de concreto e tijolos de solo cimento com adição de argila expandida para fins de conforto térmico. Monografia. Universidade Federal de Alagoas. Delmiro Gouveia, 2021.

WOLF, P. S. Resistência, densidade e desempenho termo-acústico do concreto com espuma de poliestireno expandido (EPS) aplicado às construções. UNIOESTE. Cascavel, 2008.

APÊNDICE – Tabelas dos ensaios de condutividade térmica

As Tabelas 9, 10 e 11 apresentam mais detalhadamente os valores obtidos no ensaio com o concreto autoadesável, Já as Tabelas 12, 13 e 14 apresentam os valores obtidos no ensaio com o concreto com 10% de espuma e as Tabelas 15, 16 e 17 apresentam os resultados o ensaio realizado com o concreto com 20% de espuma.

Tabela 9: Resultado do ensaio da amostra 1 do CAA.

CP 1 CAA				
Tempo (min)	Face que recebe o calor	Face oposta a fonte de calor		Temperatura ambiente (°C)
	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)		
	Média			ΔT
0	25,8	25,8		0
5	79,7	25,9		53,8
10	80,6	26		54,6
15	84,9	26,1		58,8
20	86,9	26,2		60,7
25	89,2	26,2		63
30	92,5	26,5		66
35	94,4	26,8		67,6
40	95,3	27,1		68,2
45	96	27,6		68,4
50	96	28,1		67,9
55	96,1	28,7		67,4
60	96,2	29,3		66,9
65	96,2	29,9		66,3
70	96,3	30,7		65,6
75	96,3	31,6		64,7
80	96,4	32,2		64,2
85	96,4	32,6		63,8
90	96,5	32,8		63,7
95	96,5	34,1		62,4
100	96,5	34,8		61,7
105	96,5	35,1		61,4
110	96,5	36,1		60,4
115	96,5	36,5		60
120	96,5	36,5		60
				30,8

Fonte: Autora, 2023.

Tabela 10: Resultado do ensaio térmico da amostra 2 do CAA.

CP 2 CAA				
Tempo (min)	Face que recebe o calor	Face oposta a fonte de calor	ΔT	Temperatura ambiente (°C)
	Temperatura (°C) Média	Temperatura (°C)		
0	31,8	31,8	0	30,8
5	73,9	31,8	42,1	
10	76,7	31,8	44,9	
15	80,43	32	48,43	
20	83,4	31,8	51,6	
25	84,73	31,9	52,83	30,1
30	85,8	31,8	54	
35	92,7	31,9	60,8	29,9
40	93,3	32,1	61,2	
45	96,8	32,3	64,5	
50	96,27	32,4	63,87	29,6
55	99,5	32,7	66,8	
60	98,83	32,9	65,93	
65	99,37	33,7	65,67	
70	99,87	34,2	65,67	
75	99,2	34,5	64,7	
80	100	34,8	65,2	
85	101	35,3	65,7	
90	100,4	35,7	64,7	
95	100,7	36,2	64,5	
100	101,23	36,5	64,73	
105	101,23	37,1	64,13	
110	101,23	37,8	63,43	
115	101,3	37,6	63,7	
120	101,23	37,6	63,63	
123	101,27	37,6	63,67	28,4

Fonte: Autora, 2023.

Tabela 11: Resultado do ensaio térmico da amostra 3 do CAA.

CP 3 CAA				
Tempo (min)	Face que recebe o calor	Face oposta a fonte de calor	ΔT	Temperatura ambiente (°C)
	Temperatura (°C) Média	Temperatura (°C)		
0	29,1	29,1	0	32
5	75,43	29,1	46,33	
10	83,33	29,1	54,23	29,7
15	87,6	29,1	58,5	
20	89,4	29,2	60,2	30
25	91,67	29,3	62,37	
30	92,27	29,6	62,67	
35	93,5	29,9	63,6	
40	95	30,3	64,7	30,4
45	95,4	30,7	64,7	
50	96,93	31,3	65,63	
55	97,53	31,8	65,73	
60	96,97	32,2	64,77	30,4
65	97,87	33,1	64,77	
70	98,53	33,8	64,73	
75	99,53	34,3	65,23	
80	99,53	34,9	64,63	
85	100,07	35,6	64,47	
90	101,17	36,3	64,87	31,1
95	100,53	36,9	63,63	31,3
100	100,17	37,7	62,47	
105	100,57	37,9	62,67	
110	101,3	37,3	64	
114	101,23	37,4	63,83	

Fonte: Autora, 2023.

Tabela 12: Resultado do ensaio da amostra 1 do CCE 10%.

CP 1 CCE 10% horário 13:17				
Tempo (min)	Face que recebe o calor	Face oposta a fonte de calor	ΔT	Temperatura ambiente (°C)
	Temperatura (°C) Média	Temperatura (°C)		
0	31,6	31,6	0	33,2
5	89,4	31,6	57,8	
10	91,73	32	59,73	33,4
15	94,87	32	62,87	
20	98,17	32	66,17	33,7
25	99,4	31,8	67,6	33,6
30	99,93	32	67,93	
35	102,33	32,1	70,23	33,8
40	104	32,6	71,4	
45	107	32,6	74,4	
50	107	33,1	73,9	
55	107,67	33,2	74,47	33,8
60	108,67	33,8	74,87	33,9
65	109,33	33,9	75,43	
70	110	34,2	75,8	
75	110	34,6	75,4	
80	110,33	35,2	75,13	33,9
85	110,33	35,6	74,73	
90	111,33	36	75,33	
95	111	36,3	74,7	
100	111	36,7	74,3	
105	112,33	36,9	75,43	
110	113	37,2	75,8	
115	113	37,6	75,4	
120	113,67	37,9	75,77	
125	111,67	38,6	73,07	
130	111	38,6	72,4	
135	110,67	38,3	72,37	
140	110,67	38,5	72,17	
145	110,67	38,2	72,47	
150	111	38,6	72,4	33,9

Fonte: Autora, 2023.

Tabela 13: Resultado do ensaio térmico da amostra 2 do CCE 10%.

CP 2 CCE 10% horário 16:42				
Tempo (min)	Face que recebe o calor	Face oposta a fonte de calor	ΔT	Temperatura ambiente (°C)
	Temperatura (°C) Média	Temperatura (°C)		
0	32,6	32,6	0	31,9
5	85,93	32,5	53,43	
10	88,33	32,5	55,83	
15	89,93	32,5	57,43	
20	92,77	32,4	60,37	31,8
25	92,93	32,4	60,53	
30	95,8	32,5	63,3	
35	97,77	32,5	65,27	
40	98,53	32,6	65,93	
45	100,43	32,6	67,83	
50	100,1	32,9	67,2	
55	100,77	33,2	67,57	
60	102,43	33,5	68,93	31,5
65	102,43	33,9	68,53	
70	101,87	34,1	67,77	
75	102,23	34,5	67,73	
80	102,5	34,9	67,6	
85	102,4	35,2	67,2	31,3
90	102,4	35,4	67	31,2
95	102,53	35,8	66,73	
100	102,33	36,4	65,93	
105	102,43	36,7	65,73	
110	102,67	36,7	65,97	
115	102,4	37,2	65,2	
120	103,13	37,3	65,83	
125	103,33	37,9	65,43	31
130	103,93	38,1	65,83	
135	103,73	39,2	64,53	
140	103,23	39,8	63,43	30,9
145	103,27	40	63,27	
150	103,3	40,5	62,8	
155	103,97	40,7	63,27	
160	103,87	40,9	62,97	30,6
165	105	41,2	63,8	30,5
170	104,33	41,3	63,03	
175	103,57	40,9	62,67	
180	103,67	41,4	62,27	
185	103,53	41,4	62,13	
190	103,9	41,4	62,5	30

Fonte: Autora, 2023.

Tabela 14: Resultado do ensaio térmico da amostra 3 do CCE 10%.

CP 3 CCE 10% horário 8:00				
Tempo (min)	Face que recebe o calor	Face oposta a fonte de calor	ΔT	Temperatura ambiente (°C)
	Temperatura (°C) Média	Temperatura (°C)		
0	27,6	27,6	0	27,8
5	72	27,6	44,4	28,7
10	78,63	27,6	51,03	28,2
15	81,63	27,6	54,03	28,4
20	85,03	27,8	57,23	28,5
25	86,5	27,9	58,6	28,7
30	87,67	28	59,67	
35	88,43	28,1	60,33	28,9
40	90,23	28,3	61,93	29
45	91,1	28,6	62,5	29,2
50	92	28,9	63,1	29,4
55	92,6	29,2	63,4	29,5
60	92,9	29,7	63,2	29,6
65	94,03	30,3	63,73	29,9
70	94,77	30,6	64,17	30,1
75	95,4	30,9	64,5	
80	95,63	31,3	64,33	
85	96,47	31,8	64,67	
90	96,63	32,2	64,43	
95	96,8	32,6	64,2	30,3
100	97,43	33,2	64,23	30,5
105	97,6	33,4	64,2	
110	97,8	33,9	63,9	
115	97,83	34,3	63,53	
120	98,27	34,8	63,47	30,6
125	98,2	35,2	63	31
130	98,43	35,4	63,03	
135	98,87	35,7	63,17	
140	98,9	36,2	62,7	31,4
145	98,97	36,7	62,27	
150	98,93	36,9	62,03	31,5
155	98,87	37	61,87	
160	100,53	37,6	62,93	
165	101,63	37,8	63,83	
170	103,7	37,9	65,8	
175	103,23	37,9	65,33	
180	103,67	38	65,67	
185	103,4	38,1	65,3	
190	103,5	38,5	65	31,1
195	103,67	38,4	65,27	31,2

Tabela 15: Resultado do ensaio térmico da amostra 1 do CCE 20%.

CP 1 CCE 20% horário 11:48					
Tempo (min)	Face que recebe o calor	Face oposta a fonte de calor	ΔT	Temperatura ambiente (°C)	
	Temperatura (°C) Média	Temperatura (°C)			
0	31	31	0	31,6	
5	72,27	31,1	41,17	32	
10	82,63	31,4	51,23	32,3	
15	84,87	31,6	53,27	32,5	
20	88,27	31,6	56,67	32,8	
25	89,5	31,7	57,8	33	
30	91,57	31,9	59,67	33,2	
35	93,03	32	61,03	33,4	
40	93,7	32,3	61,4	33,5	
45	95,2	32,5	62,7	33,8	
50	96	32,7	63,3		
55	95,93	32,9	63,03	33,9	
60	96,6	33,1	63,5	34	
65	98,6	33,1	65,5	33,8	
70	97,67	33,3	64,37	33,6	
75	100,03	33,7	66,33		
80	99,33	34,1	65,23	33,8	
85	100,5	34,4	66,1	33,9	
90	99,83	34,6	65,23	34	
95	100,03	34,6	65,43	33,8	
100	100,43	35,1	65,33		
105	100,77	35,3	65,47		
110	100,77	35,8	64,97	33,9	
115	100,77	36,1	64,67	34,3	
120	101,4	36,4	65	34,4	
125	101,47	36,6	64,87	34,5	
130	100,7	36,7	64	34,4	
135	100,93	36,8	64,13		
140	101,4	36,9	64,5	34,1	
145	101,4	37	64,4	34	
150	101,47	37,2	64,27		
155	102,23	37,7	64,53	34,2	
160	102,37	37,9	64,47	34,4	
165	102,33	38,1	64,23		
170	102,57	38,3	64,27		
175	101,73	38,3	63,43		
180	103,1	38,1	65	34,4	
185	103,17	38,7	64,47		
190	103,57	38,9	64,67		
195	103,4	39,2	64,2		

200	103	39,2	63,8	
205	102,8	39,2	63,6	
210	103,5	39,2	64,3	
215	103,17	39,2	63,97	
220	103,2	39,3	63,9	34,5
225	103,57	39,2	64,37	34,5
230	103,5	39,1	64,4	
235	103,83	39,4	64,43	
240	104,27	39,6	64,67	
245	103,83	39,6	64,23	
250	103,33	39,9	63,43	
255	103,27	40,1	63,17	34,3
260	103,07	40,1	62,97	
265	103,5	40,1	63,4	
270	103,5	40,1	63,4	34,2
275	103,5	40,1	63,4	

Fonte: Autora, 2023.

Tabela 16: Resultado do ensaio térmica da amostra 2 do CCE 20%.

CP 2 CCE 20% horário 16:57					
Tempo (min)	Face que recebe o calor	Face oposta a fonte de calor		ΔT	Temperatura ambiente (°C)
	Temperatura (°C) Média	Temperatura (°C)			
0	33,6	33,6		0	33,6
5	85,23	33,6		51,63	
10	90,17	33,6		56,57	33,4
15	92,77	33,6		59,17	
20	94,67	33,4		61,27	33,2
25	95,83	33,4		62,43	33,1
30	96,43	33,4		63,03	
35	97,43	33,4		64,03	33
40	97,77	33,5		64,27	
45	97,93	33,6		64,33	32,7
50	98	33,7		64,3	
55	100,27	34		66,27	
60	101,17	34,2		66,97	32,4
65	102,63	34,3		68,33	
70	102,3	34,8		67,5	32,2
75	102,67	34,9		67,77	
80	102,73	35,2		67,53	
85	102,73	35,3		67,43	
90	102,33	35,6		66,73	
95	102,37	35,9		66,47	31,8
100	102,57	36,1		66,47	
105	101,9	36,4		65,5	
110	102,17	36,5		65,67	
115	102,17	36,8		65,37	
120	102,33	37		65,33	
125	102,43	37,1		65,33	
130	102,43	37,3		65,13	
135	101,73	37,3		64,43	31
140	102,57	37,6		64,97	30,8
145	102,37	37,8		64,57	30,8
150	102,4	38		64,4	30,7
155	102,4	38,1		64,3	
160	102,4	38,1		64,3	30,5
165	102,43	38,4		64,03	
170	102,43	38,3		64,13	
175	102,4	38,7		63,7	30,4
180	102,4	38,8		63,6	
185	101,73	38,9		62,83	30,2
190	101,73	38,9		62,83	
195	102,17	39,1		63,07	30,1

200	102	39,2	62,8	
205	102,1	39,3	62,8	
210	102,07	39	63,07	29,9
215	102,1	39,2	62,9	29,8
220	102,1	39,3	62,8	
225	102,5	39,3	63,2	
230	102,1	39,3	62,8	
235	102,4	39,3	63,1	
240	102,5	39,6	62,9	
245	102,5	39,6	62,9	
250	102,5	39,6	62,9	
255	102,6	39,8	62,8	
260	102,6	40	62,6	29,8
265	102,6	40	62,6	29,7
270	102,6	40	62,6	
275	102,6	40	62,6	
280	102,6	40	62,6	
285	102,6	40	62,6	

Fonte: Autora, 2023.

Tabela 17: Resultado do ensaio térmico da amostra 3 do CCE 20%.

CP 3 CCE 20% horário 7:25					
Tempo (min)	Face que recebe o calor	Face oposta a fonte de calor	ΔT	Temperatura ambiente (°C)	
	Temperatura (°C)				
	Média	Temperatura (°C)			
0	28,2	28,2	0	27,8	
5	69,6	28,2	41,4	28	
10	78,97	28,2	50,77		
15	83,27	28,2	55,07	28,1	
20	85,9	28,2	57,7		
25	89,43	28,2	61,23		
30	90,1	28,2	61,9		
35	94,3	28,3	66		
40	95,03	28,5	66,53	28,2	
45	95,33	28,6	66,73		
50	95,47	28,8	66,67		
55	95,73	29,1	66,63	28,4	
60	96,5	29,3	67,2		
65	96,93	29,8	67,13	28,5	
70	98,7	30,1	68,6		
75	98,7	30,5	68,2	28,8	
80	99,87	30,8	69,07		
85	98,23	31,2	67,03		
90	99,23	31,6	67,63	29,2	
95	99,43	32	67,43		
100	100,23	32,2	68,03	29,5	
105	100,23	32,6	67,63		
110	99,97	33,1	66,87	29,8	
115	99,77	33,5	66,27		
120	100,1	33,9	66,2	30,2	
125	100,43	34,1	66,33	30,2	
130	100,43	34,5	65,93	30,4	
135	100,37	34,8	65,57	30,5	
140	100,17	35,2	64,97		
145	100,37	35,3	65,07	30,8	
150	100,6	35,8	64,8		
155	100,93	35,9	65,03		
160	100,73	36,2	64,53	31,2	
165	101,63	36,6	65,03	31,4	
170	101,93	36,8	65,13	31,5	
175	101,57	37	64,57	31,7	
180	101,9	37,2	64,7		
185	102	37,4	64,6	31,8	
190	101,83	37,6	64,23		
195	101,9	37,6	64,3	31,8	

200	103,33	37,7	65,63	
205	103,67	37,9	65,77	31,9
210	104,33	37,9	66,43	32
215	105,33	38,1	67,23	
220	104,33	38,1	66,23	
225	104,33	38,8	65,53	31,8
230	104,67	38,8	65,87	32,1
235	105,67	39,1	66,57	32,3
240	105,67	39,3	66,37	32,5
245	105,67	39,2	66,47	
250	105,33	39,8	65,53	33,1
255	105,67	39,7	65,97	
260	106,33	40	66,33	33,2
265	106,33	40,2	66,13	33,4
270	106	40,3	65,7	33,5
275	106	40	66	
280	106	40,3	65,7	33,6
285	106	40,2	65,8	
290	106	40,2	65,8	
295	106	40,2	65,8	33,8

Fonte: Autora, 2023.