



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**



**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DE UMA PAREDE DE
CONCRETO ARMADO SUBMETIDO A TEMPERATURAS
EXTREMAS**

Fábio Masato Yamanaka

**Belém - PA
Novembro/2024**

FÁBIO MASATO YAMANAKA

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DE UMA PAREDE DE
CONCRETO ARMADO SUBMETIDO A TEMPERATURAS
EXTREMAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia Civil do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Marcelo Rassy Teixeira

**Belém - PA
Novembro/2024**

FÁBIO MASATO YAMANAKA

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DE UMA PAREDE DE
CONCRETO ARMADO SUBMETIDO A TEMPERATURAS
EXTREMAS**

Belém, 27 de novembro de 2024

Prof. Marcelo Rassy Teixeira
Dr. pela USP
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcelo Rassy Teixeira (UFPA)
DSc. pela USP

Prof. Dr. Plinio Glauber Carvalho dos Prazeres (UFPA)
DSc. Pela TU GRAZ

Profa. Dra. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro (UFPA)
DSc. pela UFRGS

CONCEITO FINAL: _____.

ANÁLISE DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DE UMA PAREDE DE CONCRETO ARMADO SUBMETIDO A TEMPERATURAS EXTREMAS

Fábio Masato Yamanaka¹; Remo Magalhães de Souza²; Marcelo Rassy Teixeira³;

(1) Engenharia Civil | ITEC – UFPA | fabioyamanaka08@gmail.com

(2) Professor Doutor | ITEC – UFPA | remodesouza@ufpa.br

(3) Professor Doutor | ITEC – UFPA | mrt@ufpa.br

RESUMO

A pesquisa tem como foco a análise das propriedades térmicas de uma parede de concreto armado submetida a elevadas temperaturas, como as encontradas em fornos de cozimento de anodos, utilizados na produção de alumínio. O problema central envolve a degradação estrutural do concreto em função das variações térmicas intensas, o que pode comprometer a integridade e a durabilidade da estrutura. O objetivo do estudo foi investigar as propriedades térmicas do concreto em condições de trabalho sob altas temperaturas. Os métodos empregados incluíram a extração de corpos de prova da parede de concreto e bloco de concreto isolante, para medições experimentais da condutividade térmica, coeficiente de expansão linear e cálculo do peso específico, que foram realizadas por meio de análises termomecânicas, avaliando a expansão térmica linear pela variação da temperatura, método comparativo para condutividade térmica e cálculos básicos para peso específico. Os resultados mostraram uma condutividade térmica menor nas amostras expostas a altas temperaturas em comparação com os valores referenciados para condições de temperatura ambiente. Essa redução pode estar relacionada à deterioração das propriedades térmicas e mecânicas do concreto sob elevadas temperaturas, o que pode causar deformações e fissuras. O estudo é caracterizado como preliminar para futuras investigações, que incluem estudos experimentais e modelos numéricos para avaliar o comportamento do concreto em longos períodos de operação a altas temperaturas.

Palavras-chave: Concreto, dilatação térmica linear, propriedades térmicas, indústria do alumínio primário, refratário.

ABSTRACT

The research focuses on analyzing the thermal properties of a reinforced concrete wall subjected to high temperatures, such as those found in anode baking furnaces used in aluminum production. The central problem involves the structural degradation of concrete due to intense thermal variations, which can compromise the integrity and durability of the structure. The aim

of the study was to investigate the thermal properties of concrete under working conditions at elevated temperatures. The methods used included the extraction of test specimens from the concrete wall and insulating concrete block for experimental measurements of thermal conductivity, linear expansion coefficient, and specific weight calculation. These were performed through thermomechanical analyses, evaluating linear thermal expansion as a function of temperature variation, a comparative method for thermal conductivity, and basic calculations for specific weight. The results showed lower thermal conductivity in the samples exposed to high temperatures compared to reference values for ambient temperature conditions. This reduction may be related to the deterioration of the thermal and mechanical properties of the concrete at elevated temperatures, which can lead to deformations and cracks. The study is considered preliminary for future investigations, including experimental studies and numerical models to assess the behavior of concrete over extended periods of operation at high temperatures.

Keywords: concrete, linear thermal expansion, thermal properties, primary aluminium industry, refractory.

1. INTRODUÇÃO

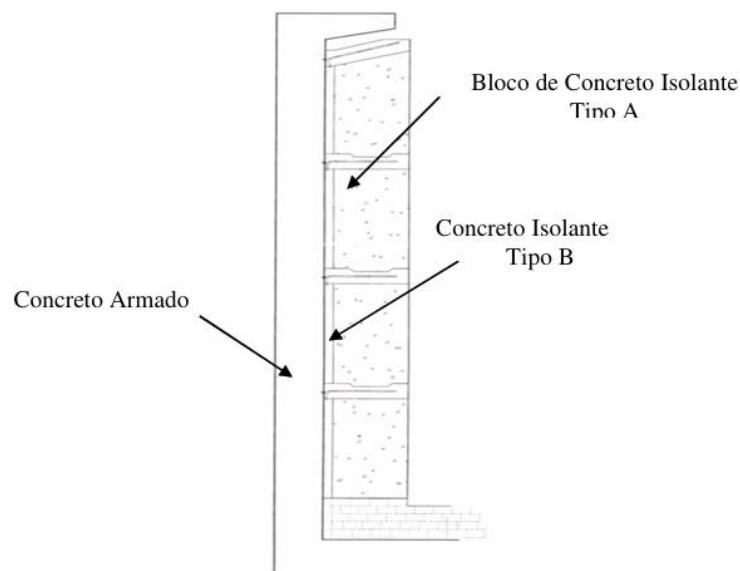
Na indústria, especialmente nos setores metalúrgico e siderúrgico, o uso de paredes de concreto é fundamental devido às exigências extremas desses ambientes. Essas instalações operam sob temperaturas elevadas, como nos processos de redução da alumina calcinada (processo Hall-Héroult), na fundição de metais e no processo de produção de blocos de coque e piche, conhecidos como blocos anódicos ou anodos.

O processo de fabricação dos blocos anódicos segue uma série de etapas para assegurar as propriedades adequadas ao produto final. Primeiramente, o coque de petróleo, utilizado como agregado, é misturado ao piche de alcatrão, que atua como ligante. A mistura é compactada, formando o bloco de anodo verde. Em seguida, os blocos são levados aos fornos de cozimento, que operam a uma temperatura máxima de aproximadamente 1300°C, para adquirir as propriedades químicas e mecânicas necessárias para o processo de eletrólise da produção de alumínio. Na oficina de chumbamento, hastes metálicas são fixadas ao anodo, permitindo sua instalação nas cubas eletrolíticas.

O forno de cozimento de anodo B, selecionado para este estudo, é o mais antigo em operação na fábrica, com 20 anos de atividade contínua. Ao longo desse tempo, ele passou por duas reformas em seu revestimento refratário e isolante, essenciais para manter a eficiência térmica e a integridade estrutural do equipamento. A primeira reforma ocorreu há 8 anos, quando o forno já havia superado uma boa parte de sua vida útil prevista. Este ano, o forno B passou por uma segunda reforma, após completar 170 ciclos de uso. Inicialmente, a vida útil planejada para o revestimento era de 100 ciclos.

O forno opera em temperaturas extremamente elevadas, com isso as paredes localizadas nas extremidades têm a função crucial de conter o fluxo de calor gerado durante o processo de operação, ao mesmo tempo em que mantêm um equilíbrio térmico com o ambiente externo, que permanece à temperatura ambiente. Para cumprir essa função de forma eficiente, a parede externa do forno é composta por três camadas adjacentes, cada uma feita de materiais com diferentes propriedades térmicas e mecânicas, conforme ilustrado na Figura 1. Essas camadas são projetadas para otimizar o isolamento térmico e garantir a resistência estrutural necessária para suportar as condições extremas do forno.

Figura 1. Detalhe da parede de concreto e seus componentes.



Fonte: Autores, 2024.

Cada camada foi projetada com propriedades específicas para desempenhar sua função de acordo com a faixa de temperatura a que é submetida. A camada mais interna, em contato direto com o interior do forno, é composta por blocos de concreto isolante (Tipo A), sendo a mais exposta às altas temperaturas do processo. Os blocos de concreto isolante da camada

interna são fixados à estrutura de concreto armado por meio de um sistema de ancoragem, sendo a camada intermediária, composta por concreto isolante (Tipo B), que atua como uma barreira adicional, melhorando o isolamento térmico e garantindo uma transição eficaz entre as diferentes zonas de temperatura. Por sua vez, a camada externa é feita de concreto armado e tem a função de fornecer estabilidade mecânica à estrutura, sendo a menos afetada pelo gradiente térmico.

No entanto, a estrutura de concreto armado, diferente das outras camadas, permanece original desde sua construção, há duas décadas. Isso levanta questões importantes quanto à sua durabilidade e comportamento sob condições extremas, como as temperaturas elevadas e os ciclos térmicos intensos. A ausência de reformas na estrutura de concreto em todo esse período torna relevante a investigação sobre as alterações físico-químicas dos materiais envolvidos, que podem comprometer sua integridade ao longo do tempo.

Com isso, este estudo tem como objetivo a análise das propriedades térmicas dos componentes da parede de concreto mencionada. A pesquisa inclui a determinação da condutividade térmica, coeficiente de dilatação térmica e peso específico dos materiais, que servirão de base para a validação de um modelo numérico via método dos elementos finitos.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O concreto pode estar sujeito, de forma acidental, a altas temperaturas ou exposto a elas como parte de suas condições normais de operação (Ferreira, 2011). Quando essas condições fazem parte do ambiente operacional normal, espera-se que a estrutura permaneça íntegra, suportando as variações térmicas sem apresentar falhas ou deformações significativas. A integridade da estrutura é essencial para garantir sua durabilidade e desempenho ao longo do tempo, principalmente em processos que envolvem altas temperaturas.

Para garantir a durabilidade dessas estruturas, deve-se levar em consideração diversos fatores, como os mecanismos de deterioração do concreto e das armaduras, além da agressividade do ambiente em que a estrutura será inserida. Além disso, ainda de acordo com a NBR 6118:2014, os mecanismos de deterioração da estrutura estão relacionados a diversos fatores, incluindo ações mecânicas, movimentações de origem térmica, impactos, ações

cíclicas, retração, fluência e relaxação. Esses fenômenos afetam diretamente a integridade e o desempenho estrutural, contribuindo para a degradação progressiva ao longo do tempo.

Para compreender o comportamento de uma estrutura, é essencial analisar o ambiente em que ela estará inserida. Dependendo do nível de agressividade desse ambiente, a vida útil da estrutura de concreto pode ser significativamente reduzida, resultando em problemas de durabilidade e comprometendo o seu desempenho.

Cardoso (2012) afirma que, ao serem submetidos a altas temperaturas, os concretos convencionais têm sua vida útil significativamente reduzida, o que geralmente resulta na necessidade de manutenções frequentes. Sob essas condições, os elementos estruturais sofrem aumentos significativos de temperatura, o que provoca uma série de transformações físicas e químicas nos materiais que compõem a estrutura. Essas mudanças resultam em uma degradação progressiva das propriedades térmicas, como a capacidade de condução de calor, e das propriedades mecânicas, como a resistência à compressão e a rigidez do concreto (Kodur, 2019).

Segundo Patel *et al.* (2020), as propriedades mecânicas do concreto são significativamente afetadas quando expostas a temperaturas elevadas, dependendo do nível de exposição. À medida que a temperatura de exposição aumenta, a deterioração do concreto torna-se mais severa. Reduções na resistência à compressão, na resistência à tração e na resistência à flexão são esperadas.

As propriedades térmicas que determinam a distribuição de temperatura em uma estrutura são expansão térmica, calor específico e a condutividade térmica (Kodur, 2019).

A expansão térmica define o quanto um material se expande ou contrai quando há uma variação de temperatura. A NBR 12817:2014 define o calor específico como a quantidade de calor necessária para aumentar a temperatura de uma massa unitária de material em 1°C.

A NBR 12820:2012, define a condutividade térmica como a capacidade de um material de transmitir calor, ou seja, indica a quantidade de fluxo de calor que atravessa uma área unitária de um material quando submetido a um gradiente de temperatura unitário.

Dependendo da aplicação, pode-se desejar que o concreto apresente maior ou menor condutividade térmica. Condutividades térmicas mais baixas, por exemplo, são preferíveis quando o objetivo é melhorar as propriedades de isolamento térmico, o que contribui para a

eficiência energética ao reduzir o consumo de energia nesses ambientes (Daza-Badilla *et al.*, 2024).

A condutividade térmica é de grande importância, pois determina a taxa de condução do calor e, conseqüentemente, a magnitude dos gradientes de temperatura e das tensões térmicas (Mindess e Young, 1981 *apud* Nardino e Machado, 2024).

Breugel (1998), aponta uma faixa de condutividade térmica do concreto que varia de 1,2 a 3,5 W/mK.

Azenha (2009) cita os resultados de condutividade térmica do concreto de diferentes autores, em aplicações submetidas a temperatura aproximada de 20°C, que variam entre 1,2 a 3,6 W/mK.

De acordo com Bažant e Kaplan (1996 *apud* Kodur, 2014) a condutividade térmica do concreto em temperatura ambiente fica entre 1,4 e 3,6 W/mK.

Em estudos mais recentes de Kodur (2019), foi obtido o valor aproximado de 2 W/mK para a condutividade térmica da amostra que estão operando em temperatura ambiente.

Tabela 1. Resultados de condutividade térmica de diferentes autores.

REFERÊNCIA	K (W/mK) máx.	K (W/mK) min.
BREUGEL (1998)	3,50	1,20
JAPANESE CONCRETE INSTITUTE (1985 <i>apud</i> Azenha, 2009)	2,90	2,50
NEVILLE (1995 <i>apud</i> Azenha,2009)	3,60	1,40
SILVEIRA (1996 <i>apud</i> Azenha 2009)	2,40	1,20
BAŽANT E KAPLAN (1996 <i>apud</i> Kodur, 2014)	3,60	1,40
KODUR (2019)	2,00	2,00

Fonte: Autores, 2024.

A NBR 15220-3 (2005) estabelece um valor de 1,75 W/mK para a condutividade térmica de concretos convencionais.

Tabela 2. Condutividade térmica de acordo com norma.

REFERÊNCIA	K (W/mK) máx.	K (W/mK) min.
NBR 15220 (2005)	1,75	1,75

Fonte: Autores, 2024.

No caso das câmaras de cozimento, onde a temperatura pode atingir 1300°C, o principal mecanismo de transferência de calor é a convecção. O ar em movimento, originado da queima de combustível, circula através de um sistema de ventilação e exaustão, transportando o calor gerado pelo processo de combustão. Esse fluido quente entra em contato com as superfícies internas da câmara, promovendo a troca de calor.

Por outro lado, na parede externa do forno de cozimento, o principal mecanismo de transferência de calor é a condução. A energia térmica gerada no interior do forno é gradualmente transmitida através das camadas de materiais que compõem o sistema e a parede de concreto.

Conforme Azenha (2009), as transferências de calor nos concretos podem acontecer de três formas, sendo a primeira delas a condução, em que a movimentação das moléculas em virtude das vibrações ou até mesmo a movimentação dos elétrons caracteriza a transferência de energia térmica. A segunda é a convecção que ocorre a partir da movimentação dos fluidos, em que os fluidos quentes são substituídos pelos fluidos frios em um processo constante. Por fim, a radiação se caracteriza pela troca de calor por ondas eletromagnéticas.

A propagação do calor no concreto ocorre predominantemente por condução, devido à diferença de temperatura entre o interior, mais frio, e a superfície, mais quente, pela difusividade térmica, pelo calor específico e pela condutividade térmica do material. Além disso, o concreto apresenta baixa capacidade de condução de calor, o que torna o processo de transferência térmica em seu interior relativamente lento quando comparado a materiais como o aço. Esse comportamento resulta na formação de um gradiente térmico significativo no interior do concreto, provocando alterações em suas propriedades (Britez, 2011).

3. METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo envolve a realização de ensaios laboratoriais e levantamentos in loco, com o objetivo de obter propriedades essenciais dos materiais para o entendimento da distribuição de temperatura na estrutura. As propriedades analisadas incluem a condutividade térmica do concreto convencional, coeficiente de dilatação térmica e peso específico dos blocos de concreto isolante.

3.1. DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO CONCRETO CONVENCIONAL

A extração dos testemunhos foi realizada conforme as recomendações da NBR 7680-1:2015, a qual especifica que as amostras cilíndricas extraídas devem ser homogêneas e íntegras do concreto. Para isso, foi utilizado um detector de metais (pacômetro) da marca Bosch, modelo DMO 10 (Figura 2.a), para a localização de armaduras na estrutura, com o objetivo de retirar testemunhos de concreto sem a interferência das barras de aço. Definido os locais sem a presença de armaduras, com isso procede-se a extração dos corpos de prova com o auxílio de uma máquina extratora, com serra diamantada (Figura 2.b).

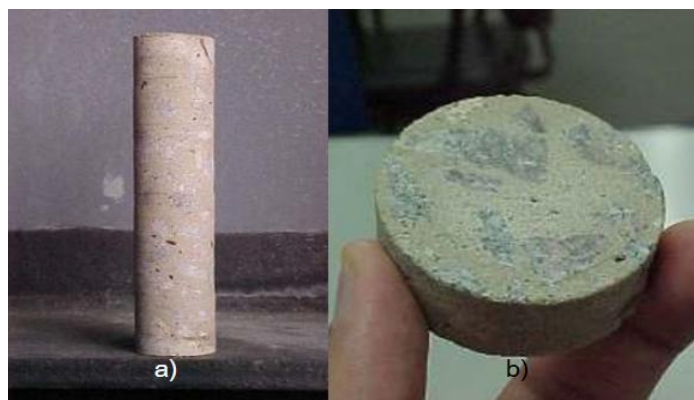
Figura 2. Equipamentos. (a) Pacômetro. (b) Máquina extratora.



Fonte: Autores, 2024.

Foram extraídos corpos de prova com dimensões aproximadas de 50 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento (Figura 3.a). Em seguida, as amostras foram cortadas com uma espessura de 20 mm (Figura 3.b), resultando nas dimensões de 50 mm por 20 mm. Em seguida, tiveram as faces retificadas, as dimensões foram escolhidas especificamente para a utilização do equipamento de medição de condutividade térmica disponível para este estudo.

Figura 3. Corpos de Prova. (a) Corpo de prova de concreto da parede. (b) Pastilha preparada.



Fonte: Autores, 2024.

A norma ISO 12987:2004, recomendada pelo fabricante do equipamento, descreve a metodologia para medir a condutividade térmica de um material utilizando o método comparativo. Assim, o valor de condutividade térmica pode ser obtido por equação ou, no caso, fornecido pelo próprio equipamento.

O equipamento utilizado para medir a condutividade térmica do material é fabricado pela R&D Carbon (Figura 4), possui uma precisão de 0,10% e opera a uma temperatura padrão de 60°C. O método de análise é fundamentado em medições comparativas, onde uma amostra com altura de 20 mm é fixada entre dois cabeçotes, um aquecido a 60°C e outro resfriado a 20°C. Uma vez atingido o equilíbrio térmico, a temperatura obtida é medida e comparada com a obtida num material de referência com uma condutividade conhecida para determinar a condutividade térmica do material analisado.

Figura 4. Equipamento para medição da condutividade térmica.



Fonte: Autores, 2024.

3.2. DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE MÉDIO DE DILATAÇÃO TÉRMICA LINEAR DO CONCRETO ISOLANTE

A ASTM E831-14 recomenda um método para a determinação da expansão térmica linear de materiais de construção por meio de análise termomecânica. Este teste avalia o coeficiente de expansão térmica linear medindo a variação de comprimento da amostra em uma variação de temperatura.

No forno de cozimento de anodo em estudo, foi coletada uma amostra do bloco de concreto isolante Tipo A. Utilizando-se uma serra de corte diamantada, foram preparadas amostras com geometria prismática, com dimensões de 100 mm de altura e 50 mm de lado, conforme ilustrado na Figura 5. Essas amostras foram preparadas para permitir a realização de

ensaios laboratoriais específicos, com o objetivo de analisar as propriedades térmicas e mecânicas do material.

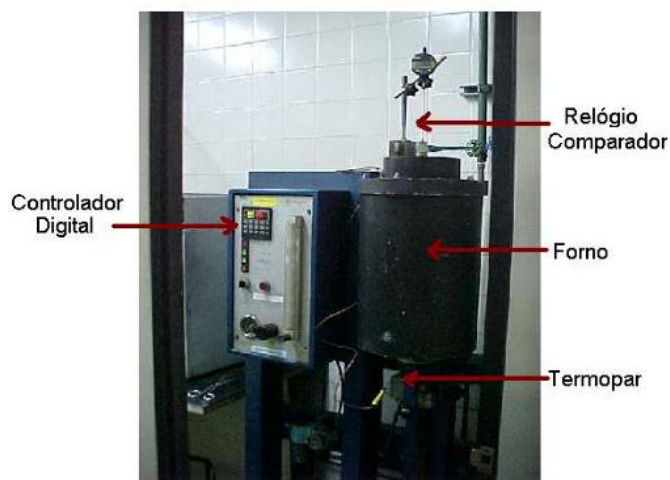
Figura 5. Amostras do bloco de concreto isolante tipo A.



Fonte: Autores, 2024.

Para a determinação experimental do coeficiente de dilatação térmica do concreto isolante Tipo A, foi utilizado um equipamento especialmente preparado para esta pesquisa (Figura 6). O sistema de medição consistiu em um forno com controle preciso de variação de temperatura, operando com sensores de temperatura (termopares) e um controlador digital, capaz de atingir temperaturas de até 600°C. As deformações das amostras foram registradas por meio de um relógio comparador digital. Combinando o uso do forno, do controlador digital, do relógio comparador e dos termopares, foi possível medir com precisão as deformações e as respectivas temperaturas presentes no sistema, garantindo dados confiáveis para a análise do coeficiente de dilatação térmica.

Figura 6. Equipamento para o ensaio de dilatação térmica.



Fonte: Autores, 2024.

Inicialmente, o forno foi aquecido a 600°C para quantificar a deformação térmica do sistema de medição, composto por uma haste cerâmica e um suporte metálico de apoio para o corpo de prova, sem a presença da amostra. Em seguida, o corpo de prova foi inserido no forno e submetido à mesma variação térmica de 600°C, permitindo uma análise comparativa das deformações térmicas, com e sem o material testado. Para o cálculo do coeficiente de dilatação térmica (α), utiliza-se a fórmula:

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L_0 \cdot \Delta T} \quad (1)$$

Onde,

α = É o coeficiente de dilatação térmica (em 1/°C),

ΔL = é a variação de comprimento (dilatação) do corpo de prova,

L_0 = é o comprimento inicial do corpo de prova,

ΔT = é a variação de temperatura durante o experimento (°C).

3.3. DETERMINAÇÃO PESO ESPECÍFICO DO CONCRETO ISOLANTE

Inicialmente, as dimensões das amostras prismáticas foram medidas com o auxílio de um paquímetro, garantindo a obtenção precisa das médias necessárias para os cálculos. O volume das amostras foi calculado utilizando a fórmula para o volume de um prisma retangular e convertido para metros cúbicos (m³), a fim de padronizar as unidades para o cálculo do peso específico. Posteriormente, o peso de cada amostra foi determinado por meio de uma balança de precisão.

O cálculo do peso específico foi realizado utilizando a seguinte fórmula:

$$\gamma = \frac{P}{V} \quad (2)$$

Onde,

γ = é o peso específico (kgf/m³),

P = é o peso da amostra (kgf),

V = é o volume da amostra (m³).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO CONCRETO CONVENCIONAL

Foram preparadas 28 (vinte e oito) pastilhas da estrutura, e para cada pastilha foram realizadas cinco medições da condutividade térmica. Com a média dos resultados de cada amostra, juntamente com a média geral de todos os resultados, foi possível obter um valor final de condutividade térmica de $k_1=1,18$ W/mK.

A condutividade térmica obtida experimentalmente foi comparada aos valores encontrados na literatura citada, os quais as amostras operavam a temperatura ambiente.

A condutividade térmica obtida experimentalmente foi comparada com os valores encontrados na literatura, onde as amostras operavam a temperatura ambiente. O resultado experimental, obtido de uma amostra submetida a condições de elevadas temperaturas, demonstrou variações significativas quando comparado com essas referências.

4.2. COEFICIENTE DE DILATAÇÃO TÉRMICA DO CONCRETO ISOLANTE

Tabela 3. Resultados experimentais da dilatação térmica

Amostra	1ª Leitura	2ª Leitura	3ª Leitura	Média	Dilatação Amostra	Desvio
Sistema	1,26	1,24	1,20	1,23	-	0,03
1	1,56	1,36	1,38	1,43	0,20	0,11
2	1,54	1,34	1,36	1,41	0,18	0,11
3	1,57	1,35	1,36	1,42	0,19	0,12
4	1,58	1,37	1,38	1,44	0,21	0,12
5	1,54	1,38	1,37	1,43	0,19	0,10
6	1,56	1,38	1,39	1,44	0,21	0,10

Fonte: Autores, 2024.

A partir do experimento, foi registrada uma dilatação média de 0,20 mm, levando em consideração exclusivamente a variação dimensional do corpo de prova. Com base nesse valor e utilizando a Equação 1 para cálculo, foi determinado o coeficiente de dilatação térmica do material, que resultou em $0,00000328$ $1/^\circ\text{C}$.

4.3. PESO ESPECÍFICO DO CONCRETO ISOLANTE

Com os valores de peso e volumetria obtidos para cada uma das 6 amostras de concreto isolante A, foi possível aplicar a Equação 2, que define o peso específico como a razão entre o peso da amostra (em quilogramas-força, kgf) e o seu volume (em metros cúbicos, m³). Foi calculado o peso específico médio, resultando em um valor de 1420,39 kgf/m³.

4.4. RESUMO DAS PROPRIEDADES

Em resumo, na Tabela 4 são apresentados os valores das propriedades dos materiais utilizados neste estudo.

Tabela 4. Propriedades dos materiais

Propriedade	Concreto Convencional	Concreto Isolante B	Bloco de Concreto Isolante A	Solo (Areia Compactada)
Peso Específico (kgf/m ³)	2351,20	500,00	1420,39* (exp.)	1936,80
Módulo de Elasticidade (MPa)	21383,00	5000,00	6000,00	79,29
Condutividade Térmica (W/mK)	1,18* (exp.)	0,14	0,42	-
Calor Específico (J/kgK)	880	1000	1000	-
Coefficiente de Dilatação Térmica (10 ⁻⁶ /°C)	9,8999	7,00	3,28* (exp.)	-
Coefficiente de Poisson	0,15	0,20	0,20	0,30

*(exp.) – Resultados obtidos experimentalmente.

Fonte: Autores, 2024.

Os valores identificados com a sigla (exp.) referem-se a resultados obtidos por meio de experimentos conduzidos durante a pesquisa. Por outro lado, os demais valores apresentados foram coletados de fontes secundárias, como informações disponibilizadas pelos fabricantes dos concretos e parâmetros estabelecidos em normas técnicas relevantes.

5. CONCLUSÃO

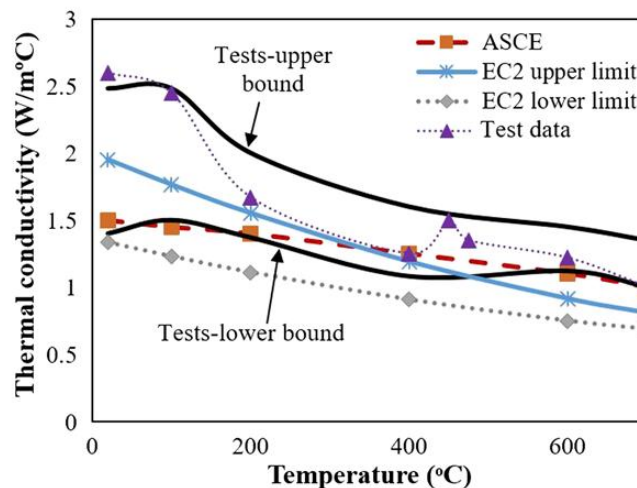
O presente estudo investigou as propriedades térmicas da parede de concreto armado e de seus componentes, utilizada nas câmaras de cozimento de blocos anódicos em uma fábrica de alumínio. Foi possível determinar a condutividade térmica do concreto convencional, que resultou em 1,18 W/mK. Além disso, uma pesquisa na literatura apresentou valores de

condutividade térmica de diferentes autores, conforme mostrado na Tabela 1, resultando em uma média de 1,62 W/mK. Comparando esse valor com o normatizado pela NBR 15220 (2005), que é de 1,75 W/mK, a diferença observada foi de apenas 8,02%, o que indica que a diferença não é significativa.

Entretanto, as amostras desses estudos estavam sendo estudadas para a exposição à temperatura ambiente, sem levar em conta seu possível comportamento sob altas temperaturas em um determinado período, como o caso deste estudo.

Em estudos de Kodur (2019), é ilustrado o decréscimo da condutividade térmica com o aumento da temperatura, comparando os resultados com o Eurocode 2 e com o Manual ASCE, como demonstra a Figura 7.

Figura 7. Variação da condutividade térmica com a temperatura.



Fonte: Kodur, 2019.

A maioria dos autores estabelece uma faixa de análise que varia desde a temperatura ambiente, em torno de 20°C, até aproximadamente 600°C ou 800°C. Essa faixa é amplamente estudada, pois indica condições típicas em que o concreto pode estar exposto, como em incêndios ou em processos industriais moderados. No entanto, poucos estudos se aprofundam em faixas de temperatura mais elevadas, como 1000°C a 1300°C, que podem ocorrer em aplicações específicas, como fornos industriais de altas temperaturas.

Ao comparar o valor de condutividade térmica obtido neste estudo, que foi de 1,18 W/mK, com o valor normativo estabelecido pela NBR 15220 (2005), de 1,75 W/mK, observa-se uma diferença significativa de -32,57%. Essa diferença expressiva pode estar relacionada a diversos

fatores, como a condição específica de operação do concreto em altas temperaturas em um período de aproximadamente 20 anos.

Esse comportamento indica que, sob as condições experimentais avaliadas, o concreto apresentou uma redução significativa em sua capacidade de condução térmica, o que pode impactar diretamente seu desempenho, durabilidade e estabilidade. A diminuição da eficiência na transferência de calor da superfície para o interior, ou vice-versa, resulta em um gradiente térmico mais acentuado. Essa distribuição desigual de calor pode causar variações na expansão e contração em diferentes partes do concreto, gerando tensões térmicas. Tais tensões, podem levar ao surgimento de fissuras, comprometendo a integridade estrutural e a resistência do concreto em ambientes de alta temperatura.

Os resultados obtidos são relevantes para a indústria de alumínio, especialmente em ambientes sujeitos a alta temperatura, onde o desempenho da parede de concreto afeta diretamente a eficiência e a segurança operacional. A análise dessas propriedades térmicas forneceu informações sobre a capacidade do concreto em suportar as condições de alta temperatura, características das câmaras de cozimento.

Contudo, como mencionado na introdução, o estudo segue como base para futuras investigações. O próximo passo será a realização de um estudo experimental mais abrangente, como a monitoração da estrutura e a elaboração de um modelo numérico para se entender o comportamento do concreto. Esse modelo irá relacionar os resultados experimentais com variáveis operacionais, para que sejam elaboradas propostas de reforço e/ou alteração do modelo construtivo.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7680-1: Concreto – Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto – Parte 1: Resistência à compressão axial**. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12820: Concreto endurecido – Determinação da condutividade térmica – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3: Desempenho térmico de edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social.** Rio de Janeiro, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E831: Standard test method for linear thermal expansion of solid materials by thermomechanical analysis.** West Conshohocken, 2014.

AZENHA, M. A. D. *Numerical Simulation of the Structural Behaviour of Concrete Since its Early Ages.* 2009. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2009.

CARDOSO, L. R. **Concreto refratário: constituintes, propriedades e aplicações.** Monografia (Graduação) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

BREUGEL, K. Prediction of temperature development in hardening concrete. In: SPRINGENSCHMID, R. (Ed.). **Prevention of thermal cracking in concrete at early ages.** Report 15. London: E & FN Spon, 1998.

BRITTEZ, C. A. **Avaliação de pilares de concreto armado colorido de alta resistência, submetidos a elevadas temperaturas.** Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

DAZA-BADILLA, L., GÓMEZ, R., DÍAZ-NORIEGA, R., AVUDAIAPPAN, S., SKRZYPKOWSKI, K., SAAVEDRA-FLORES, E.I., KORZENIOWSKI, W. *Thermal Conductivity in Concrete Samples with Natural and Synthetic Fibers.* **Materials**, v. 17, n. 4, p. 817, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/17/4/817>. Acesso em: 17 out. 2024.

FERREIRA, A. P. G. **Modelagem dos fenômenos de transporte termo-hídricos em meios porosos submetidos a temperaturas elevadas: aplicação a uma bicamada rocha-concreto.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2011.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 12987: Carbonaceous materials for the production of aluminium — Anodes, cathodes blocks, sidewall blocks and baked ramming pastes — Determination of the thermal conductivity using a comparative method.** Genebra, 2004.

KODUR, V. K. R. *Properties of Concrete at Elevated Temperatures.* **International Scholarly Research Notices.** 468510, 15 p., 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2014/468510>. Acesso em: 16 out. 2024

KODUR, V. K. R.; BANERJI, S.; SOLHMIRZAEI, R. Test methods for characterizing concrete properties at elevated temperature. **Fire and Materials**, v. 44, p. 381–395, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/fam.2777>. Acesso em: 17 out. 2024

NARDINO, C.; MACHADO, R. D. Análise térmica de blocos de concreto: potencial de fissuração devido ao gradiente térmico. **Caderno Pedagógico**, [S. l.], v. 21, n. 9, p. e7748, 2024. Disponível em: <https://ojs.studiespublicacoes.com.br/ojs/index.php/cadped/article/view/7748>. Acesso em: 16 out. 2024.

PATEL, V.; SINGH, B.; OJHA, P. N.; MOHAPATRA, B. N. Effect on mechanical properties and stress strain characteristics of normal and high strength concrete at elevated temperature. **Journal of Building Materials and Structures**, v. 7, n. 2, p. 199-209, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.34118/jbms.v7i2.767>. Acesso em: 18 out. 24

ROCHA, R. A. S. Efeito de alta temperatura em concretos: uma revisão da literatura. **Revista InterScientia**, [S. l.], v. 6, n. 1, p. 211–227, 2018. Disponível em: <https://periodicos.unipe.br/index.php/interscientia/article/view/726>. Acesso em: 10 out. 2024.

TEIXEIRA, M. R. **Análise Termoelástica Experimental e Computacional por Elementos Finitos da Parede Externa em Concreto Armado de um Forno de Cozimento de Anodo**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2004.