

ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE A DIFUSIVIDADE TÉRMICA E A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO A PARTIR DA EQUAÇÃO DO CALOR EM COORDENADAS CILÍNDRICAS

Iara Estrela Rodrigues¹
José de Souza Sales²
Marcel Willian Reis Sales³
Rafaela Bernardes Rabelo⁴
Charles França de Souza⁵
Michell Macedo Alves⁶

RESUMO

Dentre as características do concreto, a difusividade térmica é uma propriedade que especifica a rapidez com que o calor se propaga em um material. Seu estudo e, conseqüentemente, seu conhecimento é importante para compreender melhor o comportamento do material, a fim de controlar suas propriedades mecânicas. Este controle é importante em grandes fábricas de pré-moldados, por exemplo, onde a cura é realizada termicamente ou mesmo no uso para dimensionamento de grandes peças de concreto sujeitas a variações de temperatura, como longarinas de pontes. Também, a partir de equações analíticas é possível o uso de ensaios não destrutivos, com o uso térmico, para verificar a integridade em peças de concreto em grandes estruturas. Atualmente, o estudo disponível sobre a difusividade térmica do concreto utiliza equações empíricas ao invés de analíticas. Neste trabalho, para determinar a distribuição da temperatura, foram colocados termopares nas posições radiais no corpo de prova de concreto, imerso numa fonte de calor à temperatura constante. Em seguida, resolvendo a equação do calor em coordenadas cilíndricas, sem fonte de calor interno, considerando a propagação do calor radialmente no concreto como um meio isotrópico e homogêneo, obtendo-se uma solução analítica completa, apresentou-se um método para a obtenção da difusividade térmica. Por fim, foi apresentada uma relação entre a difusividade térmica e a resistência característica à compressão do concreto em corpos de prova.

Palavras chaves: Difusividade térmica, concreto, equação do calor.

ANALYSIS OF THE RELATIONSHIP BETWEEN THERMAL DIFFUSIVITY AND COMPRESSION RESISTANCE OF CONCRETE FROM THE HEAT EQUATION IN CYLINDRICAL COORDINATES

ABSTRACT

Among the concrete characteristics, thermal diffusivity is a property that specifies the rate of heat propagation in a material. The study is significant to better understand the material's behavior, in order to control its mechanical properties. This control is important in large precast concrete factories, where the thermal curing is common or in the design of large concrete structural elements subjected to temperature variation, like bridge girders for example. In addition, the applicability of non-destructive tests is possible when using analytical equations with the aim to verify the structural integrity of concrete elements in large structures. Existing thermal diffusivity researches apply empirical equations instead of the analytical ones. The present study of the thermal diffusivity of concrete uses empirical rather than analytical equations. These equations will be applied to determine the temperature distribution, with thermocouples placed in the radial positions of the concrete test specimen, immersed in a heat source at a constant temperature. A method to obtain the thermal diffusivity is presented by solving the heat equation in cylindrical coordinates, with no internal heat source, and considering

¹ Graduada, Universidade Estadual de Goiás - Campus Central Anápolis (GO) CCET iaraestrela.rodrigues@hotmail.com

² Professor, Doutor, Universidade Estadual de Goiás - Campus Central Anápolis (GO) CCET jose.sales@ueg.br

³ Professor, Doutor, Instituto Federal Goiano – Rio Verde (GO) marcel.sales@ifgoiano.edu.br

⁴ Mestranda, Universidade Federal de Goiás – Goiânia (GO) rafaelabernardesrabelo@gmail.com

⁵ Mestrando, Instituto Federal Goiano – Rio Verde (GO) charles.sousa@estudante.ifgoiano.edu.br

⁶ Professor, Doutor, Instituto Federal Goiano – Rio Verde (GO) michell.macedo@ifgoiano.edu.br

the heat propagation radially in the concrete as an isotropic and homogeneous medium, obtaining a complete analytical solution. Finally, a relation between the thermal diffusivity and the concrete characteristic compressive strength is presented.

Keywords: thermal diffusivity, concrete, the heat equation

Recebido em 30 de maio de 2022. Aprovado em 17 de junho de 2022.

INTRODUÇÃO

O concreto é um material versátil para a construção, e sua história atravessa milhares de anos, provando sua perenidade. Esse material é basicamente uma mistura de cimento, água, brita e areia. Ele se destaca no meio da construção devido a duas propriedades construtivas que consiste na sua resistência à água, sofrendo menor deterioração quando em contato com essa e por sua plasticidade, podendo se moldar em formas inusitadas.

O concreto, como é um material construtivo amplamente disseminado no mundo, cria-se a necessidade de conhecer suas propriedades, incluindo físico-químicas para apresentar precisão, e conseqüente confiabilidade no que diz respeito à resistência, a durabilidade, o bom aspecto e a economia na obtenção do mesmo.

Dentre suas propriedades, uma que é pouco estudada é a difusividade térmica. Atualmente não existem estudos que utilizam equações analíticas para obtenção esta propriedade do concreto.

A difusividade térmica indica como o calor se propaga através de um material, sendo assim importante para se obter o controle térmico a partir de quão rapidamente um corpo se ajusta à temperatura em sua volta. O que permite compreender como alguns parâmetros físico-químicos e a transferência de variações de temperatura no seu interior necessitam de pouca energia térmica para aumentar a temperatura no seu volume.

Essa propriedade está presente em todas as substâncias, mas a partir do trabalho de (Dickerson [11]), esta propriedade tem sido estudada em alimentos, em geral, a partir de dispositivos para a determinação da condutividade térmica nos mesmos.

Alguns materiais possuem uma alta condutividade térmica, portanto alta difusividade térmica, e estes têm mais facilidade de conduzir calor do que outros que possuem uma baixa condutividade térmica. Esta propriedade depende da temperatura e da pureza de cada material.

Há diversas formas de obtenção da difusividade térmica como aquelas baseadas em aproximações analíticas (Baïri [5]), (Silans, [7]), (Erdoğan [12]), soluções numéricas (Carbonera [8]), et al, 2002; GARROTE, et al, 2002) e aplicações de fórmulas diretas, na razão entre a condutividade térmica e o produto da capacidade calorífica e massa específica (Carbonera [8]). Esta propriedade mede a razão entre a capacidade do material em conduzir energia e a sua capacidade de acumular calor, sendo de fundamental importância em um material, como o concreto utilizado na construção civil, já que esta propriedade expressa a capacidade de difusão do calor em todas as direções e indica a facilidade com que o concreto tolera variação da temperatura (ABNT NBR 12818 [4]). Portanto, materiais de baixa difusividade térmica dificultam a transferência de variações de temperatura do exterior para o interior das construções.

As propriedades físico-químicas são importantes nos estudos de sólidos e líquidos que sofrem aquecimento e resfriamentos. E a difusividade térmica é uma dessas propriedades que indica a velocidade com que o calor se propaga através da substância, permitindo conhecer como alguns parâmetros físico-químicos são alterados (Tillmann[21]).

A difusividade térmica α também é conhecida como a razão entre a condutividade térmica K e o produto da massa específica ρ com a capacidade térmica C_p que mede a razão entre a capacidade da substância conduzir energia e a capacidade de acumular calor, dada por (Özisic, 1990):

$$\alpha = \frac{K}{\rho \cdot C_p} \quad (1)$$

Muitos métodos são classicamente utilizados para determinação da difusividade térmica de substâncias sólidas, líquidas e pastosas, por exemplo, por meio da razão entre condutividade térmica e o produto da massa específica e calor específico reportado no artigo de (Sweat[20]), da fonte de calor secundária de calor, em forma de bastão acoplado a um termopar inserido no sólido e fixado em paralelo a fonte de calor principal (Choi [10]) e de observação da distribuição da temperatura no interior da amostra ou fluido durante o aquecimento ou resfriamento (Ball [7]) e citando ainda o modelo condutivo associado a um algoritmo de otimização, que calcula a soma dos quadrados residuais obtidos da comparação entre os dados experimentais e simulados (Carciofi [9]).

Na literatura, também, aparecem determinação da difusividade térmica de alimentos com soluções analíticas com o uso da equação do calor, por exemplo, no trabalho de (Markowski [14]) e no trabalho de (Oro [16]). A equação da propagação do calor que descreve o fluxo de calor $U = U(r,z,t)$ numa substância em coordenadas cilíndricas, para uma substância, é dada por (Incropera [13]):

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial \theta^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + f(r, \theta, z, t) = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial U}{\partial t} \quad (2)$$

Onde o termo $f(r, \theta, z, t)$ representa a fonte de calor interna. Considerando a substância isotrópica e homogênea, sem fonte interna de calor, e com a propagação do calor ocorrendo radialmente, a Equação (2) torna-se:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial U}{\partial r} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial U}{\partial t} \quad (3)$$

Usando o método de separação de variáveis $U(r,t) = R(r)T(t)$ foram obtidas duas equações independentes com a constante de acoplamento λ entre as equações, cuja a solução da equação do calor (Souza e Sales [19]), o que resulta na distribuição da temperatura numa posição \mathbf{r} no instante \mathbf{t} dada por:

$$U(r,t) = T_f + 2(T_a - T_f) \sum_{i=0}^{\infty} \left[\frac{J_0\left(\frac{x_i}{\alpha} r\right)}{x_i J_1(x_i)} e^{-\lambda_i^2 \alpha t} \right] \quad (4)$$

sendo T_f a temperatura da fonte, T_a a temperatura ambiente, mesma temperatura da substância no instante inicial, a o raio do cilindro, $x_i = \lambda_i a$ as raízes da função de Bessel, J_0 é a função de primeira espécie de índice zero e J_1 a função de Bessel de primeira espécie de índice um.

Materiais e programa experimental

Para aplicação do método, foram construídos artesanalmente corpos de provas de concreto de 100,0 mm de diâmetro e 200,0 mm de altura, obedecendo às normas (ABNT NBR 5738 [1]), (ABNT NBR 5739 [2]) e (ABNT NBR 7680 [3]). Foram medidas as resistências

características do concreto à compressão por meio de um ensaio de compressão conforme a norma (ABNT NBR 5739 [2]), numa máquina de ensaio à compressão axial, que permite a aplicação controlada da força sobre o corpo com uma velocidade de carregamento de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s, sendo cessada quando uma queda de força indica a ruptura. Na tabela 1, apresenta-se os resultados dos ensaios das resistências à compressão axial, ou seja, as resistências à compressão (f_{cj}) do concreto em corpos de prova, nos traços com fator água/cimento $a/c = 0,4$; $a/c = 0,5$ e $a/c = 0,6$ com 7 dias de cura e 14 dias de cura.

Tabela 1. Resistência à compressão e difusividade térmica de cada dosagem

Idade (dias)	Dosagem (a/c)	f_{cj} (MPa)	Difusividade térmica (α) (10^{-5} m ² /min)
7	0,4	19,77	6,35
	0,5	15,71	5,53
	0,6	9,718	4,74
14	0,4	24,26	5,39
	0,5	17,23	4,86
	0,6	11,67	4,49

Especificamente, o estudo com o respectivo cálculo da difusividade térmica no concreto, é utilizado segundo a norma (ABNT NBR 12818 [4]). Em poucas palavras, um bastão de metal é colocado no centro, com uma temperatura maior que a temperatura inicial do corpo de prova. Depois de um tempo de aproximadamente 30 min, retira-se o bastão, e num processo de resfriamento mede-se as temperaturas, em intervalos de tempo, determinando as variações relativas das temperaturas com as dimensões do corpo, num aparato experimental e nos cálculos descritos pela norma (ABNT NBR 12818 [4]), e obtém-se a difusividade do concreto em um corpo de prova.

Os corpos de provas foram fabricados em três traços de concreto que são misturas de cimento, agregados miúdos (areia), com agregados graúdos (brita) e água em porções exatas, bem definidas e diferentes baseados no fator água/cimento de 0,4; 0,5; 0,6. Na confecção dos concretos em corpo de prova foi utilizado o cimento Portland CP II - 32 - F, a brita 0, a areia média e água, os quais foram analisados inicialmente em duas idades de 7 dias e 14 dias.

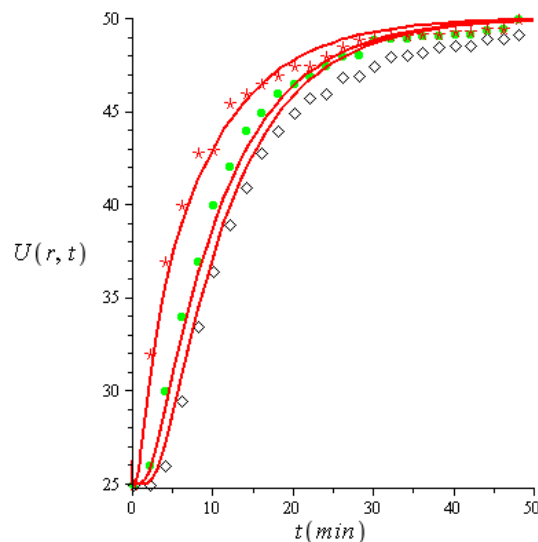
Para as medidas das temperaturas, em intervalo de tempo, os corpos de prova foram perfurados na parte superior, na posição central $r = 0,0$ mm, na posição $r = 15,0$ mm e na posição $r = 30,0$ mm, conforme pode ser visto na Figura 1. Cada furo tinha uma profundidade de 100,0 mm, onde os termopares colados alcançavam a metade da altura do corpo de prova para medidas mais confiáveis. Para dificultar a troca de calor com o meio externo, foi feito um capeamento na superfície superior do corpo que não fica em contato com a água. Quando capeados, com os termopares, em cada furo, o concreto foi colocado num banho, a uma temperatura $T_f = 50$ °C, e então foram medidas as temperaturas em intervalos de tempo de dois em dois minutos.

Figura 1 – Posição dos termopares no corpo de prova



A Figura 2 mostra a distribuição da temperatura em função do tempo, no concreto em corpo de prova, com curas de 7 dias, para os traços com fator água/cimento $a/c = 0,4$; $a/c = 0,5$ e $a/c = 0,6$ nas posições $r = 0,0$ mm (quadrado), $r = 15,0$ mm (pontos) e $r = 30,0$ mm (asteriscos). A curva sólida representa a distribuição da temperatura teórica com o valor médio da difusividade térmica encontrada, como descrita a seguir.

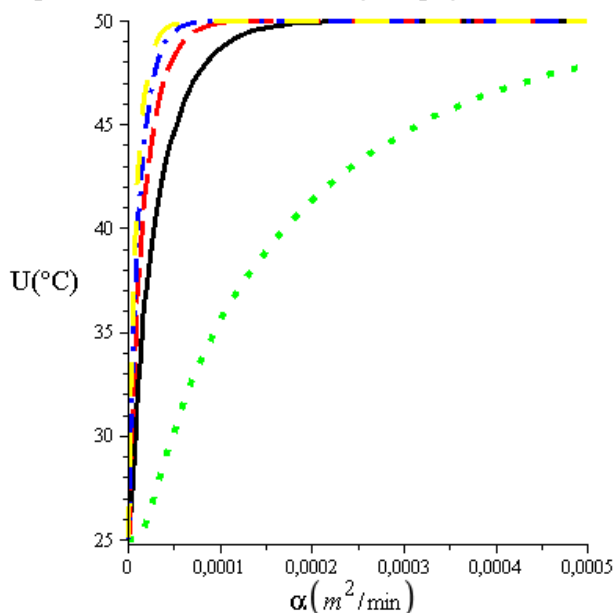
Figura 2 – Distribuição da temperatura em função do tempo para as posições 0,0 (quadrado), 1,5 mm (pontos) e 30 mm (asteriscos). Idade de 14 dias com $a/c = 0,5$ e $\alpha = 4,86 \times 10^{-5}$ m²/min. A curva sólida é a teórica.



Para encontrar difusividade térmica, com o auxílio da Equação (4), fixou-se a posição $r = 0,0$ mm, com o raio $a = 50,0$ mm do concreto em um corpo de prova, com a relação água/cimento $a/c = 0,4$ no tempo de cura de 7 dias, a uma temperatura da fonte $T_f = 50$ °C e a temperatura ambiente próxima à $T_a = 25$ °C. As curvas da distribuição da temperatura U (°C)

em função da difusividade térmica α , para o instante $t = 2,0$ min (pontos), $t = 12,0$ min (sólida), $t = 22,0$ min (traço), $t = 32,0$ min (traço-ponto) e $t = 42,0$ min (traço-espaço), são mostradas na Figura 3.

Figura 3 – Distribuição da temperatura em função do tempo para as posições 0,0 (quadrado), nos instantes $t = 20$ min (pontos), $t = 12$ minutos (sólidos), $t = 22$ minutos (traços), $t = 32$ minutos (traço-ponto) e $t = 42$ minutos (traço-espaço).



Com a temperatura medida de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, no instante $t = 2,0$ min, na curva (ponto) da Figura 3, encontrou-se a difusividade térmica do concreto de aproximadamente $1,93 \times 10^{-5}\text{ m}^2/\text{min}$, no instante $t = 12,0$ min (sólida) com a temperatura medida de $39\text{ }^{\circ}\text{C}$ encontrou-se a difusividade térmica do concreto de aproximadamente $4,58 \times 10^{-5}\text{ m}^2/\text{min}$, no instante $t = 22,0$ min (traço) com a temperatura medida de $46\text{ }^{\circ}\text{C}$ encontrou-se a difusividade térmica do concreto de aproximadamente $4,43 \times 10^{-5}\text{ m}^2/\text{min}$, no instante $t = 32,0$ min (traço-ponto) encontrou-se a difusividade térmica do concreto de aproximadamente $3,99 \times 10^{-5}\text{ m}^2/\text{min}$ e no instante $t = 42,0$ min (traço-espaço) encontrou-se a difusividade térmica do concreto de aproximadamente $3,69 \times 10^{-5}\text{ m}^2/\text{min}$ na mesma posição $r = 0,0$ mm com $a/c = 0,4$.

O processo foi repetido com a relação água/cimento $a/c = 0,4$ na posição $r = 15,0$ mm e na posição $r = 30,0$ mm. Dessa forma, encontrou-se a difusividade térmica média $\alpha = 6,35 \times 10^{-5}\text{ m}^2/\text{min}$, como pode ser visto resumidamente na tabela 1.

Como o comportamento da distribuição da temperatura U ($^{\circ}\text{C}$) em função da difusividade térmica α é exatamente o mesmo, as curvas das distribuições das temperaturas U ($^{\circ}\text{C}$) em função da difusividade térmica α tanto para a relação água/cimento $a/c = 0,5$ e $a/c = 0,6$ no tempo de cura de 7 dias quanto para 14 dias, não foram mostradas.

Utilizando-se do mesmo procedimento anterior, encontrou-se a difusividade térmica média para a relação água/cimento $a/c = 0,5$ e $a/c = 0,6$ no tempo de cura de 7 dias e a difusividade térmica média para as mesmas relações água/cimento no tempo de cura de 14 dias, mostradas na tabela 1.

Segundo a Bureau of Reclamation [6] a faixa de valores da difusividade térmica compreende de $5,83 \times 10^{-5}\text{ m}^2/\text{min}$ a $8,33 \times 10^{-5}\text{ m}^2/\text{min}$ para o concreto comum e para (Neville [15]) está entre $3,33 \times 10^{-5}\text{ m}^2/\text{min}$ a $1,0 \times 10^{-4}\text{ m}^2/\text{min}$.

De posse da difusividade térmica média (α) do concreto em corpo de prova, nas respectivas relações água/cimento e das resistências características à compressão a j dias (f_{cj}), idealizou-se o gráfico da difusividade térmica média em função do f_{cj} do concreto em corpo de prova para 7 dias e 14 dias de cura, com as relações água /cimento de 0,4; 0,5 e 0,6, como podem ser vistas nas Figura 4 e Figura 5.

Figura 4 – Difusividade térmica média α em função da resistência à compressão (f_{cj}) do corpo de prova do concreto para 7 dias de cura e relação água/cimento de 0,4, 0,5 e 0,6.

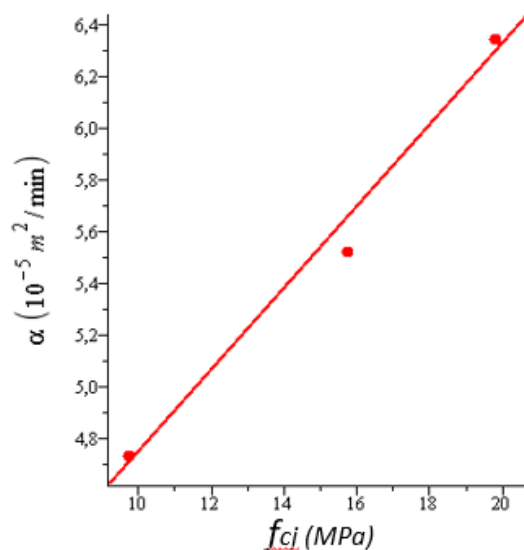
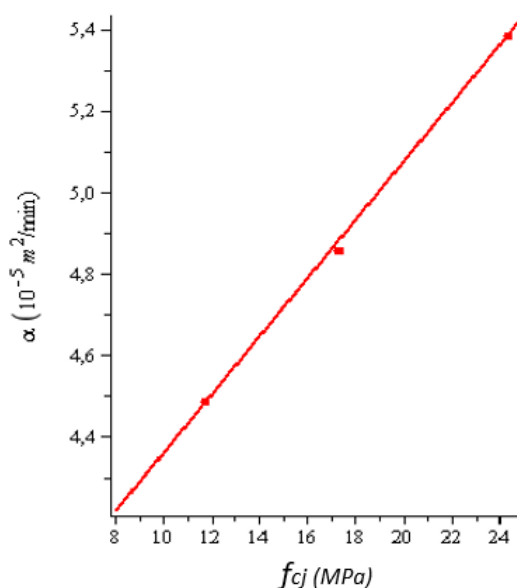


Figura 5 – Difusividade térmica média α em função da resistência à compressão (f_{cj}) do corpo de prova do concreto para 14 dias de cura e relação água/cimento de 0,4, 0,5 e 0,6.



RESULTADOS E DISCUSSÕES

A resistência característica à compressão do concreto em corpo de prova diminui com o aumento do fator água/cimento, tanto com 7 dias de cura, quanto com 14 dias de cura do mesmo.

A temperatura em todos os corpos de prova de concreto, como esperado, o ponto na posição 0,0 mm (centro) leva mais tempo, em relação aos outros pontos, para atingir o equilíbrio térmico com um aumento gradativo da distribuição da temperatura, ou seja, um aumento bem distribuído.

A temperatura, do concreto em corpo de prova, aumenta mais rapidamente, ou seja, alcança o equilíbrio térmico em cada ponto considerado com as diminuições das relações água cimento.

Como esperado, a difusividade térmica do concreto é menor que, por exemplo, a difusividade térmica do cobre, dada por $\alpha = 1153 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{min}$, uma vez que o cobre é um melhor condutor de calor que o concreto.

Observou-se também, que a difusividade térmica do corpo de prova aumenta com a diminuição do fator água/cimento a/c , isto devido ao fato de que a água tem alta capacidade térmica. E, nas relações da difusividade térmica média e a resistência característica do concreto em corpo de prova a difusividade térmica aumenta linearmente com o aumento da resistência característica à compressão do concreto no corpo de prova, tanto para o tempo de cura de 7 dias quanto para o tempo de cura de 14 dias.

Também, sabe-se da literatura que quanto menor a relação água cimento menor a quantidade de poros. Isso quer dizer que o material se torna mais consistente e com menos vazios. menos vazios significa melhor transmissão de calor no domínio.

A partir dos dados da tabela 1, com o uso dos Métodos dos Mínimos Quadrados (Spiegel [18]), encontrou-se a seguinte relação linear:

$$\alpha = 1,579 \cdot 10^{-6} f_{cj} + 3,169 \cdot 10^{-5} \quad (4)$$

para o tempo de cura de 7 dias, e

$$\alpha = 7,168 \cdot 10^{-6} f_{cj} + 3,643 \cdot 10^{-5} \quad (5)$$

para o tempo de cura de 14 dias do concreto em corpo de prova.

CONCLUSÃO

Medindo a temperatura em um dado instante, numa determinada posição radial dos pequenos volumes cilíndricos de concretos colocados num banho, com termopares, e ensaiando os corpos de prova em uma máquina de compressão axial, encontrou-se a distribuição da temperatura para diversos traços do concreto a resistência mecânica do mesmo. Com a diminuição da relação água/cimento, há um aumento da temperatura mais rapidamente, assim com consumo maior de cimento, maior será a elevação adiabática de temperatura do concreto, porém nesta faixa de medida a resistência mecânica aumenta.

Observando a distribuição de temperatura no ponto central 0,0 mm no concreto em corpo de prova notou-se que os corpos de prova com 14 dias de cura atingem mais rapidamente o seu equilíbrio térmico em relação aos corpos de 7 dias de cura. Isto acontece devido a menor presença de água em um corpo de 14 dias de cura, já que possui mais dias de vida. Esta rapidez em atingir o equilíbrio térmico é nitidamente observada na definição de difusividade térmica, que mostra que quanto maior o volume de água maior a capacidade térmica.

A redução da quantidade de água também é um fator importante pois menores relações água/cimento significam menores quantidades de poros, o que faz com que a transmissão de calor seja maior. Isso quer dizer que concretos com maior resistência à compressão geram maior transmissão de calor. Isso é importante quando o assunto é conforto térmico de um ambiente. Além, de análises mecânicas de variação de temperatura em uma estrutura.

Quanto ao método utilizado para encontrar a difusividade térmica tem-se uma grande vantagem devido a sua simplicidade de realização experimental e fácil encontro da difusividade térmica média diretamente no gráfico da temperatura em função da difusividade

térmica. Os valores encontrados da difusividade térmica média do concreto em corpo de prova são menores do que a difusividade térmica do cobre, como esperado, pois se considerada a mesma área e a mesma espessura, uma parede de concreto aquecido, esta se aquecerá mais lentamente do que o cobre nas mesmas condições.

O aumento linear da difusividade térmica proporcional ao aumento da resistência característica à compressão do concreto tanto para o tempo de 7 dias de cura quanto para 14 dias de cura, no intervalo estudado, ocorre devido a diminuição do volume de água o que resulta no aumento da resistência característica à compressão do concreto e no aumento da sua difusividade térmica.

REFERÊNCIAS

- [1] ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR5738** / 2015. Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova.
- [2] ABNT: _____.**NBR5739** / 2007. Ensaio de compressão de corpo de prova cilíndrico.
- [3] ABNT: _____.**NBR7680** / 2015. Concreto – Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto. Parte 1: Resistência à compressão axial.
- [4] ABNT: _____.**NBR12818** // 2012. Método de ensaio para determinação da difusividade térmica do concreto saturado em água.
- [5] BAÏRI, A; GÁRCIA DE MARÍA, J.M.; LARAQI, N. Computational Materials Science. 38, 2007, 838.
- [6] BUREAU OF RECLAMATION. **Cement and Concrete Investigations**: Boulder Canyon Project Final Reports. Part. 7..*Bulletin n 1* , 1940.
- [7] BALL, C. O. OLSON, F. C. W. Sterilization in food technology. Theory, Practice and Calculation., Mc Graw Hill Book Co., New York, 1957.
- [8] CARBONERA, L. et al. **Determinação experimental da difusividade térmica de uma massa de tomate comercial. Brazilian Journal of Food Technology**, v.06, n.2, p. 285 - 90, 2003.
- [10] CHOI, Y.; OKOS, M. R. **The thermal properties of liquid foods-review.II**.Paper N.83-6516, 1983b.In Proceedings of the Winter Meeting of the American Society of Agricultural Engineers. Chicago.
- [11] DICKERSON, R.W. Food Technology. 5, 1965, 198.
- [12] ERDOĞDU, F. Journal of Food Engineering. 68, 2005, 233.
- [13] INCROPERA F. P. e WITT D. P.; Fundamentos da Transferência de Calor e de Massa; Rio de Janeiro; Guanabara Koogan, 1992.
- [14] MARKOWSKI, M.; BIALOBRZEWSKI, I.; CIERACHB M.; Paulo A., of Food Engineering 65, 591–598, (2004)
- [15] NEVILLE, A. M.. **Propriedades do Concreto**. 5 Ed. Bookman, 2015.
- [16] ORO, A. C. P., BORGES B. S., IGREJA, G., MOREIRA, M. F. P. Analise da Influencia da temperatura e da umidade na difusividade térmica efetiva da soja, In Anais do XVIII EAIC, Londrina-Pr, 2009.

- [17] SILANS, A.L.; DA SILVA, F.M.; BARBOSA, F.A.R. R.Bras. Ci. Solo, 30, 2006, 41.
- [18] SPIEGEL, M. R., Estatística. Tradução e revisão técnica: Pedro Consetino.3° Ed. São Paulo: Makroc Books, 1993.
- [19] SOUZA, M. Sales, J. S. ,Aplicação da equação do calor – Cálculo da difusividade térmica.**Revista de processosquímico.**, v.9, p.27 - 31, 2015.
- [20] SWEAT, V. E. Experimental values of thermal conductivities of selected fruits and vegetables. JournalofFood Science, Chicago, n.39, p.1081-3, 1974.
- [21] TILLMANN, A. R.; GHIMARÃES, G.; SILVA, S. M. M. L.; Determinação simultânea da condutividade térmica e da difusividade térmica variando com a temperatura. In: 15° POSMEC – Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, MG: FEMEC, 2005.