

ESTUDO E SENSORIAMENTO DO COMPORTAMENTO DA TEMPERATURA DO CONCRETO NOS ESTADOS FRESCO E ENDURECIDO

Júlia Fernandes Approbato (IC) e João Carlos Gabriel (Orientador)

Apoio: PIBIC Mackenzie

RESUMO

No processo de produção do concreto, entre o cimento e a água, ocorre uma reação exotérmica, a qual é responsável pelo endurecimento do concreto. O calor liberado por essa reação, denominada calor de hidratação, é proporcional ao volume de concreto. A cura se relaciona de forma direta à qualidade do mesmo, e os procedimentos de cura destinam-se a evitar manifestações patológicas ligadas à perda de água do concreto devido ao calor de hidratação. Essas manifestações patológicas podem ocorrer através de fissurações e deformações, e comprometem a qualidade e desempenho além de elevarem os custos das estruturas devido às necessidades de recuperação das patologias que ocorrem. Por conta disso, estudos feitos a respeito dessas manifestações visam conhecer as causas das patologias de modo que possam ser prevenidas e corrigidas. Com a evolução das edificações houve um aumento significativo das dimensões de peças e volume de concreto utilizado, por conta disso, faz-se necessário controlar a temperatura interna do concreto e dissipá-la para que não atinja valores elevados, causando patologias na estrutura. Grande parte das grandezas físicas podem ser convertidas em grandezas elétricas, como variação de tensão ou corrente, e a possibilidade de transmitir estas informações faz com que seja possível realizar o monitoramento de diversos processos, inclusive o comportamento de estruturas de concreto, fazendo-se uso de sensores e transdutores.

Palavras-chave: Sensores de temperatura, concreto e patologias.

ABSTRACT

In the concrete production process, between cement and water, an exothermic reaction occurs, which is responsible for the hardening of the concrete. The heat released by this reaction, called heat of hydration, is proportional to the volume of concrete. Curing is directly related to its quality, and curing procedures are intended to prevent pathological manifestations related to the loss of water from the concrete due to the heat of hydration. These pathological manifestations can occur through cracking and deformation, and compromise the quality and performance as well as increase the costs of structures due to the recovery needs of the pathologies that occur. Because of this, studies on these manifestations aim to know the causes of pathologies so that they can be prevented and corrected. With the evolution of the buildings there was a significant increase in the dimensions of the pieces and volume of concrete used, because of this, it is necessary to control the internal temperature of the concrete and dissipate it so that it does not reach high values, causing pathologies in the structure. Most of the physical quantities can be converted into electrical quantities, such as voltage or current variation, and the possibility of transmitting this information makes it possible to monitor various processes, including the behavior of concrete structures, making use of sensors and transducers.

Keywords: Temperature sensors, concrete and pathologies.

1. INTRODUÇÃO

Durante a fabricação do concreto, o traço que é uma mistura de cimento, água, areia, brita e aditivo, sendo este último opcional, ocorre entre os dois primeiros elementos - cimento e a água - uma reação exotérmica responsável pelo endurecimento do concreto. O calor liberado por ela é denominado calor de hidratação e, quanto maior o volume de concreto, maior o calor liberado pela mistura. São vários os fatores que influenciam a quantidade de calor que a reação irá produzir, como a temperatura ambiente, o consumo e o tipo de cimento, a exposição ao sol, o processo de cura, a temperatura de lançamento do concreto, altura das camadas de concretagem e o intervalo de tempo entre elas (CARNEIRO, GIL e NETO, 2011). O enrijecimento e a pega são consequências da reação de hidratação dos aluminatos, e o desenvolvimento da resistência se dá por meio da hidratação dos silicatos (RIBEIRO, 2015). Pode-se definir a pega do concreto como a solidificação de uma mistura fresca de concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Em caso de temperaturas abaixo de 15°C o calor de hidratação é muito baixo, fazendo com que não haja ganho de resistência (MEHTA e MONTEIRO, 2014) e o tempo de pega retarde ou se paralise, sendo assim, o cimento e água não reagem e o concreto permanece no estado fresco. Quando se trata de temperaturas acima de 35°C e baixa umidade relativa, o calor de hidratação se eleva fazendo com que ocorra um aumento da evaporação da água constituinte do concreto, e fissuração de origem térmica por retração plástica. Neste ponto é comum que se faça necessário reamassar o concreto fresco. Para controlar essa perda é realizada a cura do concreto, procedimento adotado para promover a hidratação do cimento e consiste num controle da temperatura e da movimentação de umidade de fora para o interior do concreto, com o objetivo de saturar o concreto e garantir que haja a quantidade requerida para a hidratação do cimento (NEVILLE, 2016).

A água de amassamento tem grande influência na temperatura do concreto, por isso, fazer uso da mesma, resfriada e/ou com gelo, substituindo parte da água de amassamento na mistura, é uma maneira eficaz para conseguir controlar e reduzir a temperatura do concreto. A cura do concreto está diretamente relacionada a qualidade deste, e pode ser prejudicial para outras propriedades além da resistência (MEHTA e MONTEIRO, 2014). A durabilidade e a resistência solicitada em projeto somente são atingidas se a cura for executada de maneira adequada. Os procedimentos de cura do concreto visam evitar manifestações patológicas, como fissurações e deformações excessivas (ROMERO e CAMPOS, 2002).

As manifestações patológicas são todas as ocorrências que podem comprometer o desempenho das estruturas. A retração plástica é uma patologia na qual ocorre a redução

do volume do concreto, causada pela diminuição de umidade, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, com a perda de umidade, o concreto se contrai, e com o impedimento de movimentação do concreto, devido a armaduras e outros fatores, o concreto acaba gerando tensões de tração que podem romper o mesmo, havendo a manifestação de fissuras térmicas, que são outro tipo de patologia. As fissuras são aberturas causadas na superfície do concreto, podendo ter tamanhos variados. Elas acabam servindo como caminho para penetração dos agentes agressivos até a armadura, diminuem a durabilidade da peça e diminuem a sua resistência. A fissuração do concreto é o tipo mais comum de patologia, ou pelo menos é o que mais se destaca por ocorrer na superfície, chamando assim mais atenção do que as demais manifestações patológicas (PATRUNI, I. Z. et al., 2016).

Os estudos dessas manifestações patológicas buscam conhecer as causas do problema, buscando meios para prevenir e/ou corrigir a deterioração da estrutura. Os sintomas patológicos geram não só riscos a estrutura, como a diminuição da sua durabilidade, e também elevam os custos da obra, pois com a apresentação destas falhas, deve ser realizado o tratamento da estrutura, gerando assim custos de materiais e mão-de-obra para execução do serviço, para que com esta correção a estrutura recupere sua durabilidade e qualidade (MOREIRA, 2009).

Por conta da evolução em relação às dimensões das edificações atualmente, temos a execução de peças mais robustas, com um grande volume de concreto. Portanto necessita-se de cuidados especiais para que haja o controle da temperatura interna do concreto para que ela seja dissipada antes que atinja altos valores e cause patologias na estrutura.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Com o desenvolvimento de tecnologias se tem um maior controle de qualidade e, portanto, monitorar uma estrutura é um meio de evitar a ocorrência de manifestações patológicas e, significa também medir e avaliar as variáveis que descrevem o comportamento estrutural, através de sensores e equipamentos em ensaios destrutivos e não destrutivos.

Um sistema de monitoração constitui-se de sensores conectados a sistemas de aquisição, armazenamento e processamento da informação, a qual possui ligação a uma central remota. Grande parte das grandezas físicas, mecânicas e químicas é possível converter em uma grandeza elétrica, tensão ou corrente, e a possibilidade de transportar estas informações faz com que seja possível realizar o monitoramento de diversos processos, inclusive o comportamento de estruturas, fazendo uso de sensores e

transdutores. Recentemente surgiram sensores wireless, os quais não necessitam de cabos e fios para enviar sinais de informação para uma estação central, porém, necessitam de alguma alimentação de energia, ou fotovoltaica ou de baterias de longa duração para realizar as medidas e transmitir as informações. Esses foram desenvolvidos com base na tecnologia MEMS, sistema de comunicação sem fio e tecnologia de circuitos digitais. Os sensores wireless possuem várias vantagens, como o fácil transporte, instalação, reparo e principalmente o fato de dispensarem o uso de fios. Porém, a maior desvantagem é a dificuldade de transmitir o sinal em ambientes fechados que possuem paredes maciças (ASSIS, 2007).

Segundo o estudo de caso abordado por ASSIS (2007), foi realizado um estudo do comportamento da ponte de concreto armado e protendido construída sobre o rio Sorraia, em Portugal. A ponte possui o comprimento total de 1.666 metros, é constituída por três partes independentes, viaduto de acesso Norte, ponte e viaduto de acesso Sul. Um sistema de monitoramento remoto constituído por sensores de resistência elétrica e sensores de fibra óptica foram instalados no tabuleiro da ponte, de modo que realizam medições de deformação do concreto, temperatura e umidade relativa, com o objetivo de compreender as condições referentes à ponte ao longo do tempo. Tem-se em um posto de observação um sistema de aquisição de sinal, constituído por um *data logger data Taker* e dois módulos de expansão.

No estudo de ASSIS (2007) todos os equipamentos utilizados para a aquisição de sinal possibilitam medição em tempo real. Para estabelecer uma comunicação entre as unidades remotas, com o objetivo de proporcionar o envio das informações ao utilizador, foi utilizado um sistema de comunicação constituído por dois modems GSM e um computador configurado para trabalhar como servidor HTTP. Na unidade remota há um computador com uma aplicação desenvolvida em LabVIEW, o qual é capaz de captar dos dados dos sistemas de aquisição e armazená-los. O sistema de processamento de dados utilizado é composto por três blocos funcionais separados fisicamente, os utilizadores, a unidade local (UL) e as unidades remotas (UR's).

O resultado do monitoramento realizado por ASSIS (2007) permite constatar que os efeitos térmicos atuam promovendo uma maior compressão na estrutura analisada, e comparando-se os gráficos de deformação com os gráficos de temperatura, pode-se concluir que há uma forte influência da temperatura nos resultados referentes a deformação. Os materiais, neste caso o concreto, é constituído por moléculas que estão em constante movimentação, e a partir desses movimentos há geração de energia cinética, a qual é possível ser mensurada a partir da temperatura. Já a umidade relativa do ar está

relacionada com o vapor de água presente na atmosfera e a umidade do próprio concreto se relaciona com a quantidade de massa de água presente no concreto.

Para monitorar a temperatura do concreto é comum utilizar-se termopares e detectores de temperatura resistivos (RTD), que possuem como princípio de funcionamento a mudança da resistência elétrica com a temperatura. Quando se trata de monitoramentos de estruturas relacionadas à construção civil, se tem preferência pelos detectores de temperatura resistivos, principalmente por serem bastante precisos e estáveis (ASSIS, 2007).

Pode-se utilizar os sensores piezoelétricos que convertem um estímulo em um sinal que possa ser quantificado. No entanto, para que isso seja possível, é necessário que ocorra uma troca de energia entre o sensor e a estrutura submetida à medição, dessa forma o sensor deve ser um transdutor que possui uma impedância alta de entrada. Esses sensores têm como vantagem a sua alta sensibilidade e suportam altas temperaturas (LIMA, 2013).

Atualmente utiliza-se também os sensores de fibra óptica, aplicados na medição de grandezas físicas ou químicas, como tensão, temperatura e índice de refração (KLEMBBA et al, 2005). Essas fibras feitas de sílica são constituídas por núcleo, que possui diâmetro entre 5 e 50 μm , a casca, a qual envolve o núcleo, que possui espessura entre 120 a 200 μm e o revestimento primário, que é feito de um material plástico ou silicone, esse tem a função de proteger as demais camadas. Há a possibilidade de adicionar mais camadas ao sensor de fibra óptica, a fim de proporcionar mais proteção mecânica ao equipamento. O princípio de funcionamento dos sensores de fibra óptica é a propagação da luz na fibra, e é denominado reflexão interna total este fenômeno físico. Na monitoração estrutural tem se utilizado sensores de fibra óptica, destacando-se o de Fabry-Pérot, Raman e Brillouin e as redes de Bragg, que possuem vantagens adicionais quando comparadas as outras redes e sensores, como a sua elevada estabilidade de resposta ao longo do tempo, a multiplexagem, a qual faz com que seja possível integrar vários sensores em uma única fibra óptica e a auto-referenciação, que faz com que seja possível utilizar a referência da primeira medição para todas as demais medições. A rede Bragg pode ser construída no núcleo da fibra óptica, por ser uma microestrutura geralmente menor que 1 μm , através de métodos que utilizam radiações ultravioletas (ASSIS, 2007).

As vantagens dos sensores de fibra óptica estão diretamente ligadas com as propriedades da fibra óptica, que é o principal material desse tipo de sensor. Elas possuem baixa atenuação, que está ligada à perda de potência do sinal, imunidade a interferência eletromagnética e ruídos, sendo o ruído um dos maiores problemas quando se trata de

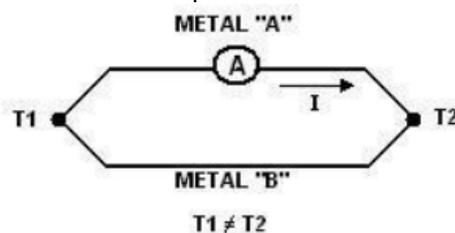
transmissão de dados, pois o mesmo pode corromper o sinal, possuem isolamento elétrico, uma característica muito interessante, pois faz com que os sensores de fibra óptica não precisem de aterramentos e a não ocorrência faíscas em caso de um curto-circuito, sendo assim, o risco de causar um princípio de incêndio ou ocorrência de choques elétricos é nula, as dimensões e peso reduzidos, que faz com que seja possível atenuar o problemas de espaço em postos de observação, e também a segurança da informação e do sistema, isso por não irradiarem de modo significativo a luz propagada.

As desvantagens dos sensores de fibra óptica estão ligadas com a sua fragilidade, os cabos ópticos exigem que sejam manuseados de maneira cuidadosa, precisam encontrar-se protegidos de maneira correta para que possa ser evitada a sua quebra, existe também a dificuldade de reparação em campo, por possuírem dimensões extremamente reduzidas qualquer reparo que se faça necessário é de alta precisão afim de não prejudicar a transmissão dos sinais, é necessário o uso de equipamentos específicos e precisos para lidar com os cabos de fibra óptica (ASSIS, 2007)

Para monitoração da temperatura do ambiente e do concreto, encontra-se disponível uma grande variedade de sensores, sendo os termopares um dos mais utilizados. Na monitoração estrutural os termopares são indicados para os casos os quais envolvem medições de altas temperaturas, vibrações intensas e choques mecânicos, isso por conta do excelente tempo de resposta do sensor (ASSIS, 2007).

Os sensores elétricos, como o termopar (Figura 1) podem ser apresentados em diversos tipos como as junções tipo K, J, N, R, S, B, T e E. Estes termopares são sensores de temperatura simples e baratos e que podem ser utilizados em vários processos. Eles são constituídos por dois metais diferentes (Metal A e Metal B) unidos por uma das extremidades. Quando ocorre uma diferença de temperatura entre a extremidade unida e as extremidades livres, ocorre uma diferença de tensão que pode ser medida por um instrumento como um voltímetro, por exemplo. Cada um dos tipos diferentes de junções é fabricado com diferentes ligas metálicas e assim, possuem diferentes curvas de tensão em função da temperatura medida.

Figura 1 – Diagrama de um medidor com termopar.



Fonte: Thermocom, 2011.

O princípio de funcionamento dos termopares se deve à descoberta em 1822 do físico Thomas Seebeck que descobriu que uma junção entre dois metais gera uma diferença de potencial quando submetido a uma temperatura.

O termopar utilizado na parte experimental foi o de junção K que é de uso genérico e que cobre temperaturas entre -200 e 1200°C . Este termopar é constituído pelas ligas *Cromel/Alumel*.

3. METODOLOGIA

Neste trabalho foi utilizado o método do estudo de caso e da pesquisa qualitativa, em função da sua adequação ao problema proposto e da comparação dos resultados obtidos com a literatura existente.

Foram selecionados três traços de concreto como base, distintos entre si, obtidos do livro “Manual de Traços de Concreto” de Gildasio R. da Silva, sendo eles com resistência de 30, 40 e 45 Mpa. Inicialmente rodou-se o traço com resistência de 30 Mpa (figura 2), o qual possuía as seguintes dosagens: 1:1,75:2,58:0,53.

Figura 2 – Corpos de prova de 30 Mpa.



Fonte: Elaborado pela autora.

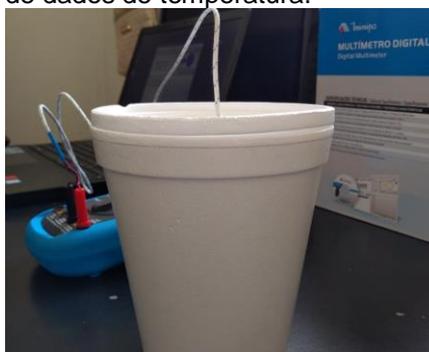
Preparou-se inicialmente 3 corpos de prova de $1,57 \times 10^{-3} \text{ m}^3$, aplicando-se desmoldante na face interna dos moldes, para fins de realização do ensaio de compressão e, para a realização da medida de temperatura, separou-se um copo de isopor de $1,80 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ (figuras 3 e 4). Como houve sobra de concreto, foram moldados mais 2 corpos de prova para fins de realização de ensaio de compressão, totalizando 5 corpos de prova.

Figura 3 – Corpo de prova para coleta dos dados de temperatura.



Fonte: Elaborado pela autora.

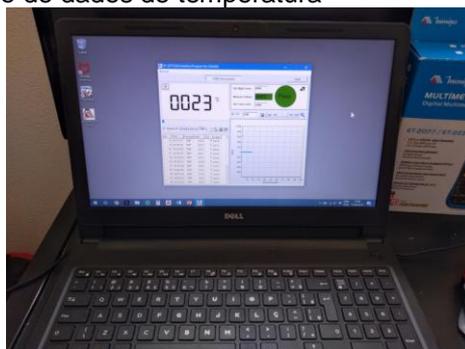
Figura 4 – Sistema de aquisição de dados de temperatura.



Fonte: Elaborado pela autora.

A medida da temperatura foi realizada com o uso de um *notebook* acoplado a um multímetro, que também mede a temperatura, Minipa ET-2077, e o software instalado no *notebook* foi o ET-2077_2232 v3.03, para armazenar as medições de temperatura. O software foi fornecido pela Minipa, fabricante do multímetro (Figura 5).

Figura 5 – Sistema de aquisição de dados de temperatura



Fonte: Elaborado pela autora.

Utilizando-se de uma balança, com precisão de duas casas decimais, pesou-se o cimento CP-III-40, areia, metade da dosagem de pedrisco e a outra metade de brita 1 e a água. Colocou-se na betoneira o pedrisco e a brita 1 com metade da dosagem de água e ligou-se a mesma por 1 minuto, em seguida adicionou-se os demais materiais e ligou-se a betoneira por mais 3 minutos. Neste momento notou-se que o concreto estava com uma consistência de “*slump zero*”, ou seja, uma mistura muito seca, então adicionou-se 0,40 litros de água e ligou-se novamente a betoneira, quando a mistura apresentou-se

homogênea desligou-se o equipamento e iniciou-se a concretagem dos corpos de prova. Com a adição da água no concreto alterou-se o traço e a resistência do mesmo. Inicialmente concretou-se o corpo de prova utilizando-se o copo de isopor, a cada uma das três camadas de concreto feita no copo aplicou-se 20 (vinte) golpes para retirada de possíveis bolhas de ar. Em seguida concretou-se os corpos de prova de $1,57 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ da mesma maneira que o corpo de prova anterior. Após a concretagem imergiu-se o termopar tipo K (ET-2077) no concreto fresco, colocou-se o corpo de prova dentro de outro copo de isopor com tampa para que o isolamento térmico fosse mais efetivo possível, e iniciou-se as medições de temperatura com o termopar conectado ao multímetro, anteriormente preparado. Com o auxílio de um termômetro, foram coletados os dados de temperatura ambiente com intervalo de 1 (uma) hora entre cada medição. No dia seguinte à concretagem foram desmoldados os corpos de prova para realização do ensaio de compressão e imergiu-se todos em um tanque com água para que durante o processo de cura do concreto ocorresse a perda de água. A concretagem foi realizada no dia 17 de abril de 2019, foram coletados os dados de temperatura durante um período de 33 horas e 1 segundo. O termopar foi reutilizado para os corpos de prova seguintes. Utilizando-se de uma serra Makita cortou-se o corpo de prova no qual mediu-se a temperatura para que fosse feita a retirada do sensor (figura 8).

Realizou-se o mesmo procedimento acima para o traço com resistência de 40 Mpa (figura 6), o qual possuía as seguintes dosagens: 1:1,24:2,08:0,43. Para este traço notou-se também, no momento da mistura dos materiais na betoneira, que a mistura estava muito seca, então adicionou-se 0,45 litros de água e ligou-se novamente a betoneira. Este procedimento também mudou o traço do concreto e a resistência do mesmo. Porém os resultados do ensaio de compressão realizados posteriormente mostraram qual a resistência do concreto com a nova adição de água. No dia seguinte à concretagem foram desmoldados os corpos de prova para o ensaio de compressão e imergiu-se todos em um tanque com água para que durante o processo de cura do concreto não se perdesse água. A concretagem foi realizada no dia 03 de junho de 2019, foram coletados os dados de temperatura durante um período de 32 horas, 40 minutos e 1 segundo. O termopar foi reutilizado para o corpo de prova a seguir. Utilizando-se de uma serra Makita cortou-se o corpo de prova para que fosse feita a retirada do sensor (figura 8).

Figura 6 – Corpos de prova de 40 Mpa



Fonte: Elaborado pela autora.

Realizou-se o mesmo procedimento acima para o traço com resistência de 45 Mpa (figura 7), o qual possuía as seguintes dosagens: 1:1,04:1,88:0,39. Para este traço notou-se também, no momento da mistura dos materiais na betoneira, que a mistura estava muito seca, então adicionou-se 0,20 litros de água e ligou-se novamente a betoneira. Com esta adição de água também se alterou o traço e a resistência do concreto. Porém, o traço de resistência de 45 Mpa é considerada somente uma base e o resultado do ensaio de compressão indicará a resistência real. No dia seguinte à concretagem foram desmoldados os corpos de prova para o ensaio de compressão e imergiu-se todos em um tanque com água para que durante o processo de cura do concreto não se perdesse água. A concretagem foi realizada no dia 11 de junho de 2019, foram coletados os dados de temperatura durante um período de 52 horas, 10 minutos e 1 segundo. O termopar foi retirado do corpo de prova utilizando-se de uma serra Makita, cortou-se o corpo de prova para que fosse feita a retirada do sensor (figura 8).

Figura 7 – Corpos de prova de 45 Mpa



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 8 – Corpo de prova após a retirada do sensor de temperatura



Fonte: Elaborado pela autora.

Para os ensaios de compressão foi utilizada a máquina de ensaios Instron (figura 9) e o software Instron Bluehill para coleta e obtenção dos gráficos de carga x deformação.

Figura 9 – Equipamento Instron para ensaio de compressão.



Fonte: Elaborado pela autora.

Para a medição das dimensões dos corpos de prova utilizou-se um paquímetro digital da Digimess (figura 10), com precisão de duas casas. Os corpos de prova com traço de resistência de 30 Mpa foram ensaiados no dia 15 de maio de 2019, após 28 dias da concretagem. Os corpos de prova com traço de resistência de 40 e 45 Mpa foram ensaiados no dia 09 de julho de 2019, após 36 e 28 dias da concretagem, respectivamente.

Figura 10 – Paquímetro digital Digimess.



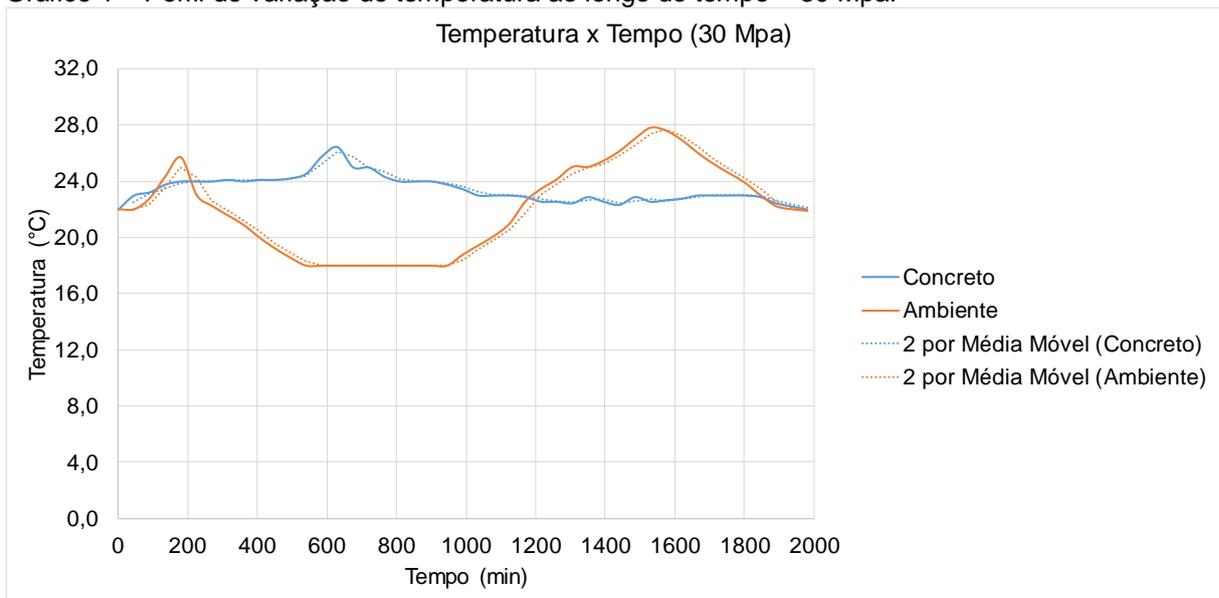
Fonte: Elaborado pela autora.

4. RESULTADO E DISCUSSÃO

Os gráficos 1, 2 e tabela 1 mostram os resultados da variação da temperatura em função do tempo, tensão deformação e valores do ensaio tensão x deformação para o corpo de prova de 30 Mpa.

No gráfico 1, pode-se observar a linha da temperatura do ambiente (laranja) e da medida da temperatura obtida com o termopar (concreto). Na linha do ambiente pode-se notar dois picos e uma depressão. O primeiro pico de quase 26°C deve-se ao horário das 14 horas onde a temperatura do dia ainda estava alta. A depressão se deve ao período noturno (aproximadamente 18°C) e a elevação seguinte deve-se à temperatura durante o dia seguinte. O ensaio de medida de temperatura do corpo de prova foi realizado a partir das 14 horas. Pode-se observar o aumento da temperatura que representa a pega do cimento (24°C) e a cura do concreto que iniciou com o pico de aproximadamente 26,5°C mesmo durante a noite na qual a temperatura ambiente caiu.

Gráfico 1 – Perfil de variação de temperatura ao longo do tempo – 30 Mpa.

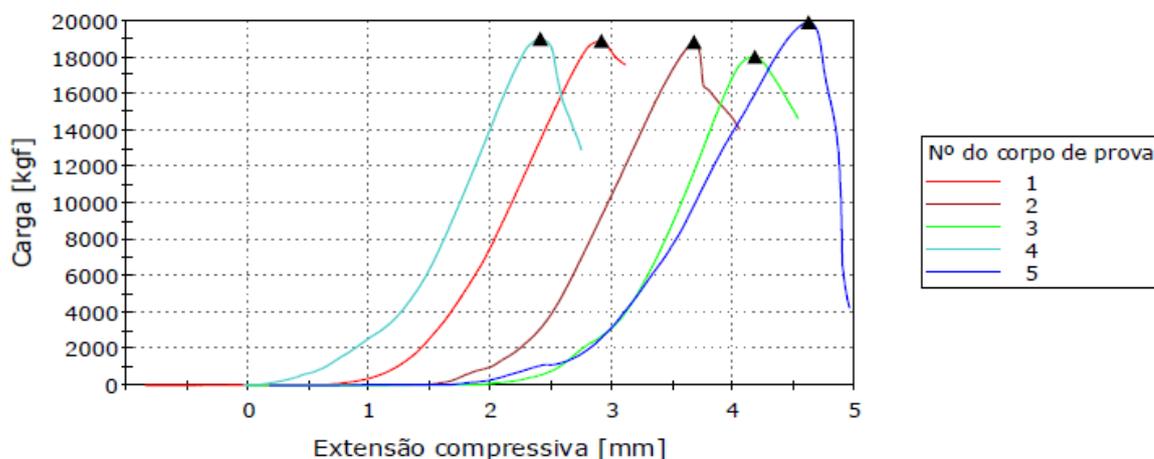


Fonte: Elaborado pela autora.

A diferença de temperatura entre o pico de temperatura da curva do concreto e a temperatura ambiente foi de 8,5°C e durou aproximadamente 200 minutos (3 horas e 20 minutos). Em seguida observou-se a queda da temperatura ao longo do tempo nos próximos 1200 minutos (a partir dos 800 minutos), perdurando por aproximadamente 10 horas.

Analisando-se o gráfico 2 e a tabela 1 dos ensaios de compressão – diagrama tensão x deformação e resultados, pode-se notar que o máximo esforço de compressão foi de 24,9 Mpa. O traço escolhido foi de 30 Mpa, porém com a adição de água ocorreu a redução da resistência do concreto. O valor médio do máximo esforço de compressão foi de 23,6 Mpa (menor que 30 Mpa).

Gráfico 2 – Diagrama tensão x deformação – 30 Mpa.
Corpo de prova 1 a 5



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 1 – Valores do ensaio tensão x deformação – 30 Mpa.

	Etiqueta do corpo de prova	Diâmetro [mm]	Altura da bigorna [mm]	Máximo Carga [kgf]	Esforço compressivo em Máximo Carga [MPa]
1	1	100,00	195,00	18875,44	23,6
2	2	100,00	195,00	18815,36	23,5
3	3	100,00	200,00	18018,72	22,5
4	4	100,00	195,00	18991,39	23,7
5	5	100,00	197,00	19903,52	24,9
Média		100,00	196,40	18920,88	23,6
Desvio padrão		0,00000	2,19089	670,38	0,83705

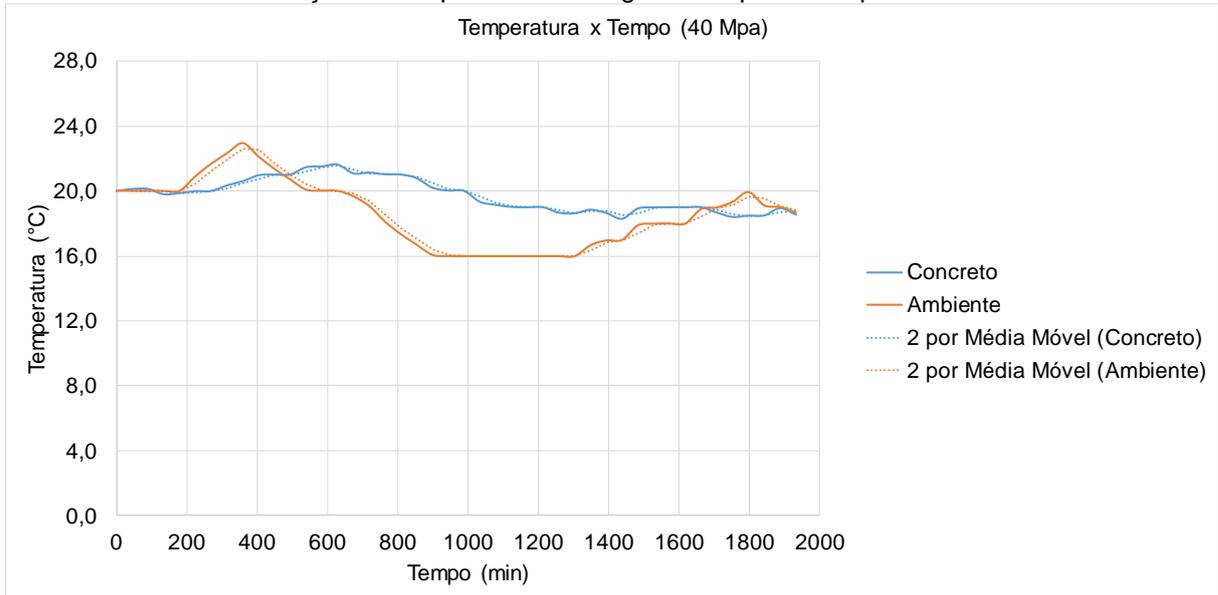
	Extensão compressiva em Máximo Carga [mm]	Tensão à compressão (Extensão) em Máximo Carga [%]
1	2,91	1,5
2	3,67	1,9
3	4,18	2,1
4	2,41	1,2
5	4,62	2,3
Média	3,56	1,8
Desvio padrão	0,90178	0,44760

Fonte: Elaborado pela autora.

Os gráficos 3, 4 e tabela 2 mostram os resultados da variação da temperatura medida pelo termopar do equipamento multitestador da Minipa, em função do tempo, tensão deformação e valores do ensaio tensão x deformação para o corpo de prova de 40 Mpa. No gráfico 3, pode-se observar a linha da temperatura do ambiente (laranja) e da medida da temperatura obtida com o termopar (concreto). Na linha do ambiente pode-se notar dois picos e uma depressão. O primeiro pico de quase 23 °C a temperatura, ao longo do dia, que aumentou e depois caiu para 16°C. No período de continuidade de 16°C durante a noite não houve medição da temperatura ambiente. A temperatura de elevação do segundo pico de aproximadamente 20°C deve-se à máxima registrada no dia seguinte em Campinas. O ensaio de medida de temperatura do corpo de prova foi realizado a partir das 8h30min. Pode-se observar o aumento da temperatura que representa a pega do cimento (22°C) e a

cura do concreto iniciou no início da tarde ocorreu por volta das 19. Durante o período da noite ocorreu a queda da temperatura ambiente e também a queda da temperatura do corpo de prova.

Gráfico 3 – Perfil de variação de temperatura ao longo do tempo – 40 Mpa.



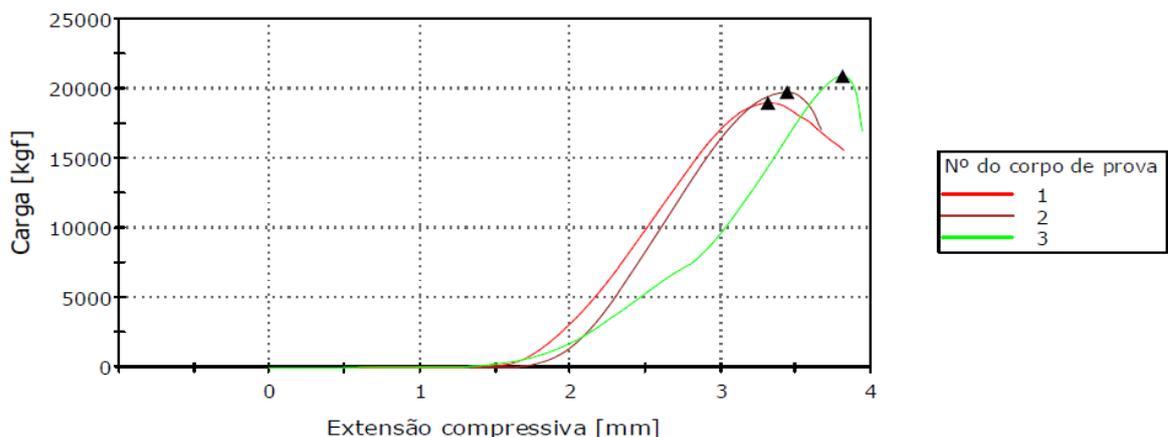
Fonte: Elaborado pela autora.

A diferença de temperatura entre o pico de temperatura da curva do concreto e a temperatura ambiente foi de 2°C e durou aproximadamente 100 minutos (1 hora e 30 minutos). Em seguida observou-se a queda da temperatura ao longo do tempo.

Analisando-se o gráfico 4 e a tabela 2 dos ensaios de compressão – diagrama tensão x deformação e resultados, pode-se notar que o máximo esforço de compressão foi de 26,6 Mpa. O traço escolhido foi de 40 Mpa, porém com a adição de água ocorreu a redução da resistência do concreto. O valor médio do máximo esforço de compressão foi de 24,8 Mpa (menor que 40 Mpa).

Gráfico 4 – Diagrama tensão x deformação – 40 Mpa.

Corpo de prova 1 a 3



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 2 – Valores do ensaio tensão x deformação – 40 Mpa.

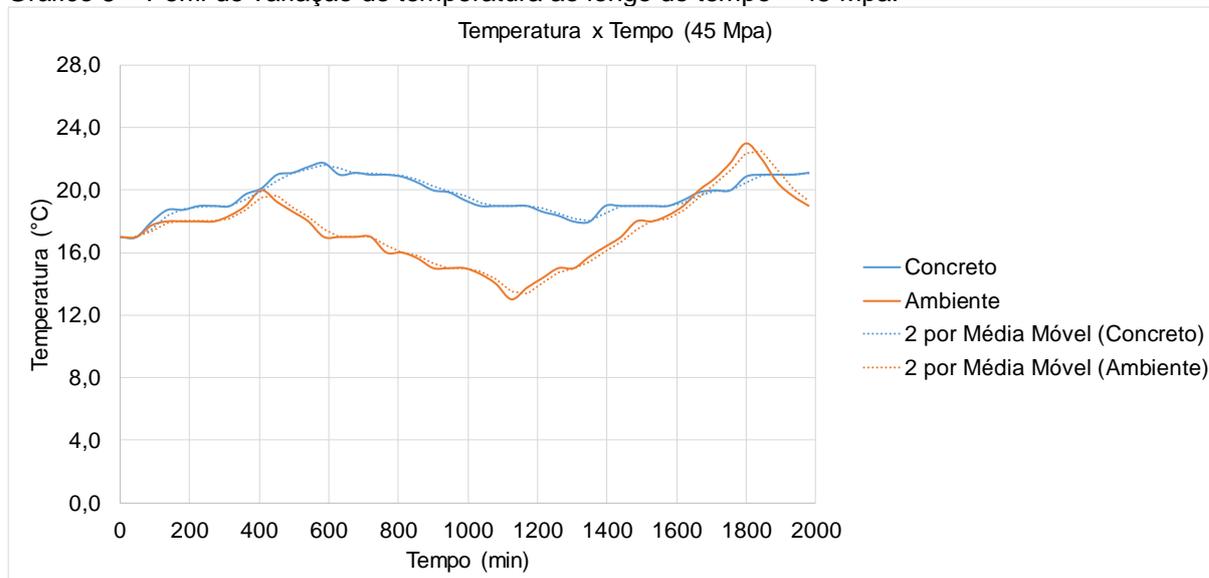
	Etiqueta do corpo de prova	Diâmetro [mm]	Altura da bigorna [mm]	Máximo Carga [kgf]	Esforço compressivo Máximo Carga [MPa]
1	Corpo de prova 2.1	100,50	202,10	18974,13	23,5
2	Corpo de prova 2.2	100,40	201,20	19736,46	24,4
3	Corpo de prova 2.3	99,10	200,50	20891,19	26,6
Média		100,00	201,27	19867,26	24,8
Desvio padrão		0,78102	0,80208	965,20	1,58586

	Extensão compressiva em Máximo Carga [mm]	Tensão à compressão (Extensão) em Máximo Carga [%]
1	3,31	1,6
2	3,44	1,7
3	3,80	1,9
Média	3,52	1,8
Desvio padrão	0,25608	0,13196

Fonte: Elaborado pela autora.

Os gráficos 5, 6 e tabela 3 mostram os resultados da variação da temperatura medida pelo termopar do equipamento multitestado da Minipa, em função do tempo, tensão deformação e valores do ensaio tensão x deformação para o corpo de prova de 45 Mpa. No gráfico 5, a linha da temperatura do ambiente (laranja) mostra também dois picos de máximo e uma depressão. O ensaio foi inicializado às 9h40min. Ocorreu um primeiro acréscimo de temperatura 100 minutos após a confecção do corpo de prova e início da medição, isto é, por volta das 11h20min, a pega do concreto. Em seguida houve um pico de temperatura 600 minutos após o início da medição, ou seja, por volta 19h40min, sendo o início de cura do concreto. O que se pode observar que a temperatura do concreto atingiu neste horário aproximadamente 22°C, posteriormente durante a noite caiu e no dia seguinte subiu novamente até atingir 21°C durante o dia, acompanhando o perfil de temperatura do ambiente.

Gráfico 5 – Perfil de variação de temperatura ao longo do tempo – 45 Mpa.

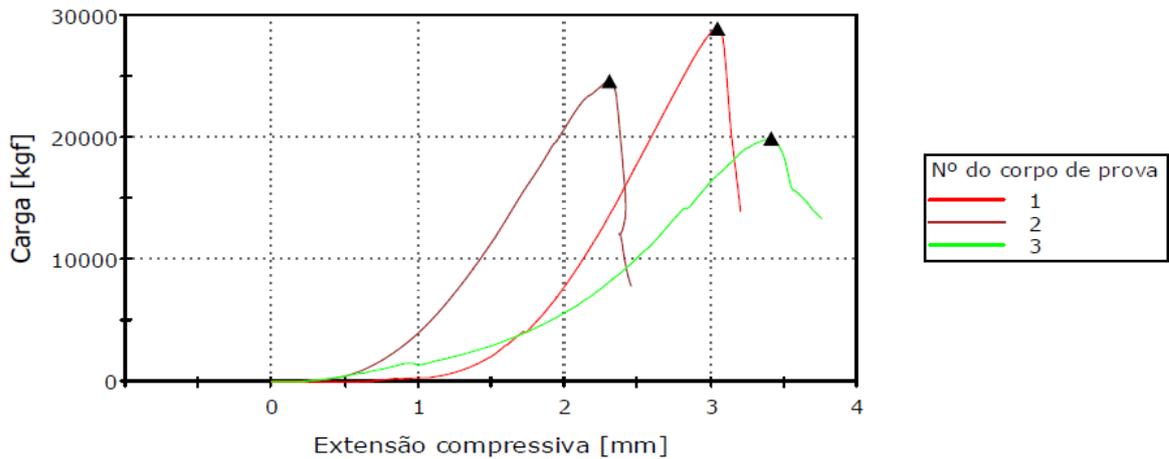


Fonte: Elaborado pela autora.

No gráfico 6 e na tabela 3 pode-se observar que a resistência máxima atingida foi de 36,5 Mpa e a média foi de 30,4 Mpa para um corpo de prova cuja base do traço de concreto foi de 45 Mpa. Porém, com a adição de água adicional o valor da resistência caiu.

Gráfico 6 – Diagrama tensão x deformação – 45 Mpa.

Corpo de prova 1 a 3



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 3 – Valores do ensaio tensão x deformação – 45 Mpa.

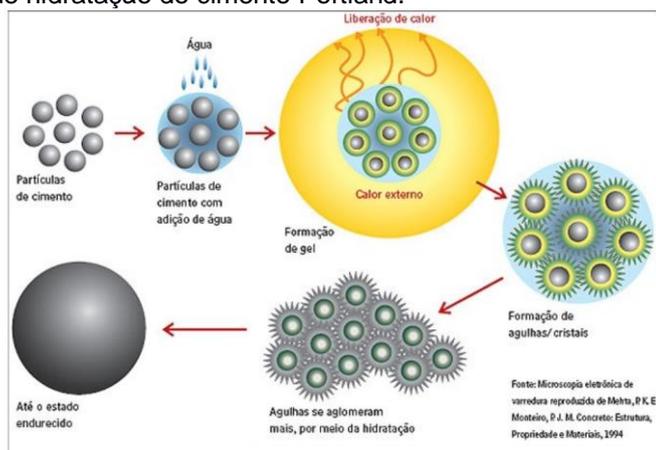
	Etiqueta do corpo de prova	Diâmetro [mm]	Altura da bigorna [mm]	Máximo Carga [kgf]	Esforço compressivo Máximo Carga [MPa]
1	corpo de prova 1	99,50	221,00	28908,61	36,5
2	corpo de prova 2	100,50	201,20	24613,87	30,4
3	corpo de prova 3	101,00	199,90	19943,01	24,4
Média		100,33	207,37	24488,50	30,4
Desvio padrão		0,76376	11,82469	4484,12	6,02449

	Extensão compressiva em Máximo Carga [mm]	Tensão à compressão (Extensão) em Máximo Carga [%]
1	3,04	1,4
2	2,30	1,1
3	3,41	1,7
Média	2,92	1,4
Desvio padrão	0,56309	0,28158

Fonte: Elaborado pela autora.

Na figura 11 pode-se observar o mecanismo de hidratação do cimento Portland, desde as partículas de cimento até o seu endurecimento final. Neste processo ocorre a taxa de liberação de calor como mostrado no gráfico 7, em seguida.

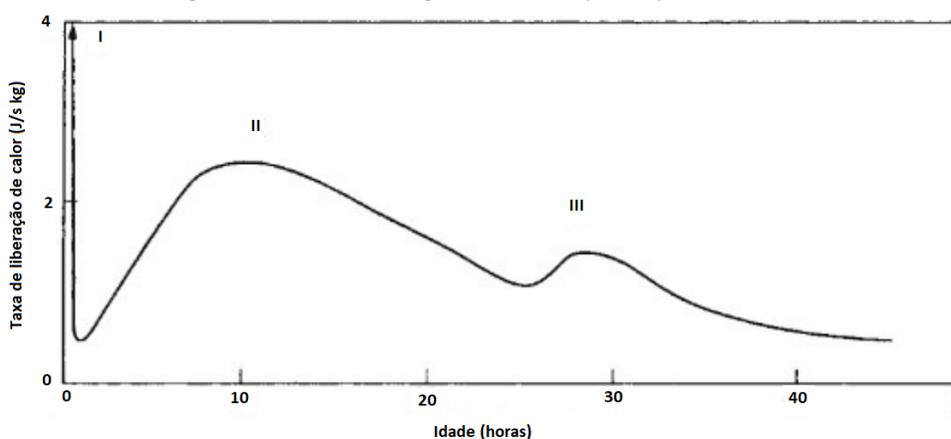
Figura 11 – Processo de hidratação do cimento Portland.



Fonte: Neville, 2016.

O gráfico 7 a seguir representa a variação da Taxa de liberação de calor (J/s kg) em função da idade (horas) obtido da literatura do Neville 2016 onde é mostrado um diagrama da taxa de liberação de calor (J/s kg) em função da idade (horas) para a hidratação do concreto. Pode-se observar 3 pontos de máximo, I, II e III. O ponto I corresponde à hidratação inicial da superfície do concreto do corpo de prova. Neste experimento não foi realizada a medição na superfície do corpo, mas sim, em seu interior. No ponto II ocorre a formação e crescimento dos cristais de hidróxido de cálcio e com ele o aumento da temperatura de hidratação. Este ponto ocorre por volta de 10 horas após a conformação do corpo de prova. Após este ponto a velocidade de hidratação diminui, aumentando novamente a velocidade de hidratação aproximadamente 30 horas após o início do experimento. Este terceiro pico é menor que o anterior.

Gráfico 7 – Taxa de liberação de calor em função da idade (horas).



Fonte: Neville, 2016.

As variações de temperatura dos pontos II e III são similares aos picos de temperatura também ocorridos nos ensaios realizados neste trabalho. O pico I de temperatura não pode ser observado no trabalho, pois a medida da temperatura foi realizada no centro do corpo de prova e não em sua superfície.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho poderiam ser feitas as seguintes considerações finais:

Com relação à definição do traço de concreto, poderiam ser mantidas as relações dos componentes do traço e para melhorar a trabalhabilidade poderia ser adicionado um aditivo ao invés de água, o que manteria a resistência mecânica à compressão como estabelecido inicialmente.

Poderia ser utilizado um segundo computador com software instalado e um segundo medidor de temperatura com termopar para medida da temperatura do ambiente e não com o uso de um termômetro de mercúrio para medida de temperatura corpórea, como realizado.

O termopar e o termômetro deveriam ser “calibrados” em uma temperatura de água com gelo a 0°C e em uma segunda temperatura próxima a 50 °C.

O isolamento térmico do corpo de prova poderia ser mais rigoroso, utilizando-se de um segundo reservatório ao redor do primeiro com uma espessura maior para evitar a influência da temperatura. O 2º reservatório utilizado teve uma parede muito fina.

Poderiam ser realizadas simultaneamente duas medidas de temperatura em função do tempo também no corpo de prova, uma em sua superfície para identificação da taxa de liberação de calor (gráfico 7 – ponto I) e a outra como realizado neste experimento.

O experimento foi realizado no CCT na cidade de Campinas em períodos de baixa temperatura tanto durante o dia como durante a noite, o que poderia influenciar os resultados de pega e cura do concreto.

Neste experimento deveriam ser realizados pelo menos 3 experimentos de medida de temperatura para cada traço do concreto para fins de comparação entre as medidas realizadas e os resultados obtidos.

6. REFERÊNCIAS

ASSIS, W. S. **Sistemas computacionais de apoio à monitoração de estruturas de engenharia civil**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2007.

CARNEIRO, G. H. S.; GIL, L. K. S.; NETO, M. P. C. **Calor de hidratação do concreto**. Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2011.

Concrete Q&A. Concrete Internacional. **Estimating evaporation rates to prevent plastic shrinkage cracking**. American Concrete Institute – ACI, 2007.

KLEMBA, F. et al. **Sensores a fibra ótica para detecção de hidrocarbonetos e monitoração da temperatura em polidutos**. Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Curitiba, 2005.

LIMA, W. B. **Transdutores de deformação a base de sensores piezoelétricos.**

Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2013.

MEDINA, B. E. **Internet das coisas em edifícios inteligentes: desenvolvimento de uma rede de sensores e atuadores sem fio para o controle de sistemas de climatização.**

Universidade Estadual de Campinas, 2017.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais.**

2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MOREIRA, K. A. W. **Estudo das manifestações patológicas na produção de pré-fabricados de concreto.** Dissertação de mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** 5. ed. São Paulo: Bookman, 2016.

PATRUNI, I. Z. et al. **Variação da temperatura em amostras de concreto devido à hidratação do cimento.** Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2016.

RIBEIRO, E. **Propriedades dos materiais constituintes do concreto.** Instituto de Pós-Graduação – IPOG, 2015.

ROMERO, J. R.; CAMPOS, A. M. **Efeitos da temperatura no concreto.** Portal do Concreto, 2002. Disponível em:

<http://www.portaldoconcreto.com.br/cimento/concreto/temperatura_concreto.html>. Acesso em: 11 dez. 2018.

SILVA, C. O.; BATTAGIN, A. F. **Impacto da temperatura do cimento na temperatura do concreto e medidas para prevenir a retração plástica.** Téchné, 2011. Disponível em: <<http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/183/artigo286922-1.aspx>>. Acesso em: 11 dez. 2018.

SILVA, R. G. **Manual de Traços de Concreto.** Rio de Janeiro: Arte e Industria Editora Ltda, 1975.

THERMOCOM. **Termopares – Efeito Seebeck.** 2011. Disponível em:

<http://www.thermocom.com.br/pdf/termopares.pdf>. Acesso em: 15 dez. 2018.

Contatos: julia.approbato@hotmail.com e joao.gabriel@mackenzie.br