

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

MIRIAN DAYANE PEREIRA

**ANÁLISE DO TEMPO DE PEGA DOS CIMENTOS COM O USO DE
CALORÍMETRO E TERMOGRAFIA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2017

MIRIAN DAYANE PEREIRA

**ANÁLISE DO TEMPO DE PEGA DOS CIMENTOS COM O USO DE
CALORÍMETRO E TERMOGRAFIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso superior em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Curitiba como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Eng. Wellington Mazer

CURITIBA

2017



Ministério da Educação
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
Campus Curitiba – Sede Ecoville
Departamento Acadêmico de Construção Civil
Curso de Engenharia Civil

FOLHA DE APROVAÇÃO

ANÁLISE DO TEMPO DE PEGA DOS CIMENTOS COM O USO DE CALORÍMETRO E TERMOGRAFIA

Por

MIRIAN DAYANE PEREIRA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido no primeiro semestre de 2017 e aprovado pela seguinte banca de avaliação:

Orientador – Wellington Mazer, Dr.
UTFPR

Prof. Adauto José Miranda de Lima, Dr.
UTFPR

Prof. Arthur Medeiros, Dr.
UTFPR

OBS.: O documento assinado encontra-se em posse da coordenação do curso.

“A persistência é o menor caminho do êxito”.

(Charles Chaplin)

RESUMO

PEREIRA, Mirian D. Análise do tempo de pega dos cimentos com o uso de calorímetro e termografia. 2017. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Departamento Acadêmico de Construção Civil (DACOC), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

Este trabalho propôs analisar o tempo de início e fim de pega do cimento CP V-ARI utilizando o calorímetro e a termografia. A pega é causada pela reação exotérmica dos compostos do cimento com a água, o calor de hidratação inicial é dado pela hidratação dos aluminatos seguida pelos silicatos e são acompanhados pela elevação da temperatura da pasta de cimento. O início de pega corresponde a parte ascendente e o fim de pega corresponde ao pico da curva da liberação de calor. Essa propriedade permite a ampla utilização do concreto de cimento Portland na construção civil. O conhecimento da quantidade de calor liberada é importante para a escolha apropriada do tipo de cimento de acordo com a temperatura ambiente na concretagem. Buscou-se analisar a viabilidade da utilização comparando os resultados, com diferentes relações água/cimento e da pasta de consistência normal, desses equipamentos com os obtidos pelo procedimento normatizado utilizando o aparelho de Vicat. Nos experimentos foi constatado a viabilidade da utilização do calorímetro para determinar os tempos de pega dos cimentos. Esse resultado foi encontrado comparando os resultados obtidos com o calorímetro aos obtidos com o aparelho de Vicat.

Palavras-chaves: Tempos de pega dos cimentos. Calor de Hidratação. Vicat. Calorímetro. Termografia.

ABSTRACT

PEREIRA, Mirian D. Analysis of the setting time of the cements with the use of calorimeter and thermography. 50 f. Course Completion Assignment, (Civil Engineering) - Civil Construction Academic Department, Federal Technological University of Paraná, Curitiba, 2017.

This work proposes to analyze the start and finish time of the CP V-ARI cement using the calorimeter and thermography. The handle is caused by the exothermic reaction of the cement compounds with water, the initial heat of hydration is given by the hydration of the aluminates followed by the silicates and are accompanied by raising the temperature of the cement paste. The handle start corresponds to the rising part and the handle end corresponds to the peak of the heat release curve. This property allows for the widespread use of Portland cement concrete in construction. The knowledge of the amount of heat released is important for the appropriate choice of the type of cement according to the ambient temperature in the concreting. It was aim to analyze the feasibility of the use by comparing the results, with different water / cement and paste ratio of normal consistency, of these equipments with those obtained by the standard procedure using the Vicat apparatus. In the experiments the feasibility of using the calorimeter was determined to determine the cement setting times. This result was found by comparing the results obtained with the calorimeter to those obtained with the Vicat apparatus.

Keywords: Cement setting times. Heat of Hydration. Vicat. Calorimeter. Thermography.

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Temperatura no calorímetro no segundo dia de ensaio.	38
Gráfico 2: Temperatura no calorímetro no segundo dia de ensaio.	38
Gráfico 3: Liberação de calor da amostra de 0,6 relação água/cimento.	39
Gráfico 4: Liberação de calor da amostra de 0,4 relação água/cimento.	40
Gráfico 5: Liberação de calor da amostra de 0,6 relação água/cimento.	40
Gráfico 6: Liberação de calor da amostra de 0,32 relação água/cimento.	41
Gráfico 7: Temperatura obtida pelo calorímetro e pela termografia.	44

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Taxa de liberação de calor de uma pasta de cimento Portland durante a pega e o período inicial de endurecimento.	17
Figura 2: Esquema do aparelho de Vicat.	23
Figura 3: Representação esquemática da situação da medição termográfica geral. 1: Meio adjacente; 2 Objeto; 3: Atmosfera; 4: Câmera	28
Figura 4: Câmera Infravermelha FLIR E60	31
Figura 5: (a) Calorímetro inacabado e (b) Vista superior do calorímetro inacabado.	33
Figura 6: (a) O recipiente fechado com o sensor de temperatura dentro dele, (b) O recipiente aberto e o sensor de temperatura cravado na tampa, (c) O Sistema Arduido protegido pela placa de MDF 3mm e (d) O calorímetro em funcionamento.	33
Figura 7: (a) Aparelho de Vicat com o molde preenchido de pasta de cimento e (b) Balança de precisão de 0,1 g.	34
Figura 8: Imagens da câmera infravermelha da mistura de água cimento com relação de 0,6.	42
Figura 9: Imagens da câmera infravermelha da mistura de água cimento com relação de 0,4.	42
Figura 10: Imagens da câmera infravermelha da mistura de água cimento com relação de 0,2.	43

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1: Os óxidos individuais e compostos do clínquer e suas abreviações.....	13
Tabela 2: Calor de hidratação dos compostos do cimento Portland.	18
Tabela 3: Tempo de início de fim de pega dos cimentos.....	36
Quadro 1: Especificações técnicas Câmera Infravermelha FLIR E60.....	29

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	OBJETIVOS	10
1.1.1	Objetivo Geral	10
1.1.2	Objetivos Específicos.....	10
1.2	JUSTIFICATIVA	10
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1	CIMENTO PORTLAND	12
2.1.1	Tipos de cimentos.....	14
2.1.2	Calor de Hidratação	15
2.1.3	Método de medição do calor de hidratação	17
2.1.4	Elevação adiabática da temperatura do cimento	18
2.1.5	Equação de transmissão de calor.....	19
2.2	COMPOSIÇÃO DOS CIMENTOS.....	20
2.2.1	Pega dos cimentos	21
2.2.2	Determinação da consistência normal	23
2.3	A TERMORGRAFIA	24
2.3.1	Termografia na construção civil	29
3	MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1	ESPECIFICAÇÕES DA CÂMERA INFRAVERMELHA	31
3.2	CONFECÇÃO DO CALORÍMETRO.....	32
3.2.1	Materiais utilizados	32
3.2.2	Procedimentos	32
3.3	PREPARAÇÃO DA PASTA.....	34
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	36

4.1	RESULTADOS DO ENSAIO DE VICAT.....	36
4.2	RESULTADOS DO ENSAIO COM CALORIMETRO	37
4.3	RESULTADOS OBTIDOS DA CÂMERA INFRATERMELHA	41
5	CONCLUSÃO	45
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	46
	REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

Para entender as propriedades do cimento Portland, é útil adquirir alguma familiaridade com seu processo de fabricação, composição mineralógica e química, e reatividade dos compostos constituintes, tais como silicatos de cálcio e aluminatos de cálcio. Além disso, propriedades do concreto que contém cimento Portland se desenvolvem como resultado de reações químicas entre os compostos do cimento Portland e a água, porque as reações de hidratação são acompanhadas por mudanças na matéria e na energia (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

A química do concreto é essencialmente a química da reação entre o cimento Portland e a água. Em qualquer reação química, as principais características de interesse são as mudanças na matéria, as mudanças na energia, e a velocidade da reação. Estes três aspectos de uma reação têm grande importância prática para o usuário do cimento Portland. O conhecimento das substâncias formadas quando o cimento Portland reage é importante porque o próprio cimento não é um material cimentante, seus produtos de hidratação é que possuem a ação de cimentação. O conhecimento da quantidade de calor liberado é importante porque o calor as vezes é uma ajuda e às vezes um obstáculo. O conhecimento da velocidade de reação também é importante porque determina o tempo de pega e endurecimento. A reação inicial deve ser suficientemente lenta para permitir que o concreto seja despejado no lugar. Por outro lado, após o concreto ter sido colocado, um endurecimento rápido é muitas vezes desejável (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Atualmente, o início e fim de pega são mensurados a partir do ensaio normatizado da NBR NM 16607 (ABNT, 2007), Cimento Portland – Determinação dos tempos de pega, utilizando o aparelho de Vicat. De acordo com essa norma, o tempo de pega é determinado pelas leituras padronizadas da agulha do aparelho, sendo o laboratorista a principal fonte de erro do ensaio. Isso ocorre devido à falta de experiência, falha ao calibrar o aparelho, erro na leitura ou na determinação de consistência normal da pasta de cimento utilizando a sonda de Tetmajer, mas também devido a oscilação da temperatura e umidade do laboratório.

Uma solução possível para eliminar o erro humano é a de adaptar equipamentos, que suprimam a necessidade do laboratorista como aferidor de tempo.

Dentre esses equipamentos, existe o calorímetro, capaz de medir o calor de hidratação da pasta de cimento através da temperatura liberada das reações químicas dos compósitos do cimento com a água. Outra técnica é a termografia, que possibilita mapear um corpo ou uma região, sem contato, com o intuito de distinguir padrões e áreas de diferentes temperaturas. Utiliza-se diversas colorações do espectro infravermelho nas imagens, variando de tons escuros, para temperaturas baixas até tons claros, para temperaturas mais altas, nesse caso a pasta de cimento seria filmada desde a mistura até o tempo final de pega (FLIR, 2012).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Esse trabalho tem como objetivo analisar tempo de início e fim de pega dos cimentos utilizando a calorimetria e a termografia.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos para o desenvolvimento desse trabalho são:

- Construir um calorímetro capaz de mensurar os tempos de pega dos cimentos;
- Comparar os resultados obtidos com o aparelho de Vicat, calorímetro e termografia na mesma pasta de cimento com diferentes relações água/cimento;
- Analisar a influência do laboratorista no resultado do experimento;
- Desenvolver novos procedimentos padronizados para replicação desses ensaios.

1.2 JUSTIFICATIVA

O avanço da automação na construção civil é perceptível e ocorre ao adaptar parâmetros da indústria seriada nos processos da obra, aumentando a eficiência e a

produtividade no canteiro. Analisando tempos e métodos para execução evita-se o retrabalho, a perda de materiais, tempo ocioso de trabalhador, gerando agilidade e segurança para os empregados. Nas partes interessadas da construção civil, como em grandes cimenteiras, centrais de concreto, fábricas de pré-fabricados, indústria cerâmica e de acessórios, a automação é quase que completa. Para isso foi necessário a inserção de novas tecnologias, práticas padronizadas, informação e formação aos funcionários.

No caso do concreto, o tempo de pega interfere de forma direta no andamento da obra, compreendendo desde o transporte desse material; tempo de deslocamento, distância do local de mistura até o local da obra, tempo limite para o seu uso; a necessidade de utilização de aditivos para acelerar ou retardar a pega; lançamentos e adensamentos, e nas fases seguintes dependentes.

Nesse trabalho, será feita a inserção de novas tecnologias na busca de automatizar e encontrar um novo e melhor método de determinar o tempo de pega dos cimentos, não excluindo totalmente o operador. O laboratorista passa a ter a função apenas de analisar os dados obtidos, e não mais de aferir e depender da expertise para calibrar e identificar na agulha de Vicat o momento de início e fim da pega. Os aparelhos utilizados, calorímetro e termografia, possuem em comum a análise da temperatura, portanto o tempo de início e fim da pega dos cimentos serão mensurados de acordo com o calor de hidratação emitido pelas reações químicas, diferentemente do aparelho de Vicat que faz a análise visual a partir da perda de trabalhabilidade e enrijecimento da pasta.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica contempla alguns assuntos que servem de embasamento para a compreensão do trabalho e cumprimento de seus objetivos.

2.1 CIMENTO PORTLAND

Os cimentos podem ser considerados como todo material com propriedade adesiva e coesiva, capaz de ligar fragmentos de minerais entre si de modo a formar um todo compacto. Os cimentos que apresentam vantagem para o preparo do concreto possuem propriedade de dar pega e endurecer dentro d'água devido as reações químicas, e são por isso, denominados cimentos hidráulicos (NEVILLE, 1982).

Segundo Bauer (2000), o cimento Portland é o produto obtido pela pulverização de clínquer constituído essencialmente de silicatos hidráulicos de cálcio, com uma certa proporção de sulfato de cálcio natural, contendo, eventualmente adições que modificam suas propriedades. Para Neville e Brooks (2013), o cimento Portland é o nome dado ao cimento resultado da mistura de calcário, argila ou outros materiais silicosos, alumina e materiais que contenham óxido de ferro.

De acordo com Isaia (2007), o cimento Portland é o mais importante material estrutural e da construção civil da atualidade. Pode ser considerado como uma das descobertas mais interessantes da história, descoberto no fim do século XIX e o seu uso intensivo no século XX.

Os constituintes fundamentais do cimento Portland são a calcário (CaCO_3), a sílica (SiO_2), a alumina (Al_2O_3), o óxido de ferro (Fe_2O_3), certa proporção de magnésia (MgO) e uma pequena porcentagem de anidrido sulfúrico (SO_3), que é adicionado após a calcinação para retardar o tempo de pega do produto. Tem-se ainda, como constituintes menores, impurezas, óxidos de sódio (Na_2O), óxido de potássio (K_2O), óxido de titânio (TiO_2) e outras substâncias de menor importância. Os óxidos de potássio e sódio constituem os denominados álcalis do cimento (BAUER, 2000).

Segundo Bauer (2000), calcário, sílica, alumina e óxido de ferro são os componentes essenciais do cimento Portland e constituem, geralmente, 95 a 96% do

total na análise de óxidos. A magnésia, que parece permanecer livre durante todo o processo de calcinação, está usualmente presente na proporção de 2 a 3%, limitada, pelas especificações, a um máximo permissível de 5%. No Brasil, esse limite é um pouco superior (6,4%). Os demais óxidos comparecem em proporção inferior a 1%, excepcionalmente 2%.

As misturas de matérias-primas que contenham, em proporções convenientes, os constituintes anteriormente relacionados, finamente pulverizada e homogeneizada, é submetida à ação do calor no forno produtor de cimento, até a temperatura de fusão incipiente, que resulta na obtenção do clínquer. Nesse processo ocorrem combinações químicas, principalmente no estado sólido, que conduzem à formação de compósitos (BAUER, 2000).

Segundo Neville e Brooks (2013), o processo de produção consiste em moer as matérias-primas cruas até a obtenção de um pó bastante fino, misturá-lo em proporções pré determinadas e queimá-las em um grande forno rotativo em um temperatura próxima a 1400 °C. No forno, ocorre a sintetização do material e a fusão parcial na forma de clínquer, que após ser resfriado recebe uma quantidade de gipsita, sendo então novamente moído até resultar em um pó fino. O resultado desse processo é o cimento Portland comercialmente utilizado.

Os compostos formados devido a essas combinações são principalmente de silicato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), silicato dicálcico ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), aluminato tricálcico ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) e ferro aluminato tetracálcico ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$). Estes quatro compostos principais determinam as propriedades hidráulicas do cimento e representam mais de 90% do cimento Portland. A porcentagem total não é igual a 100% por causa da presença de impurezas no cimento (GE, 2005).

A Tabela 1, estão demonstrado os óxidos e o compostos formados na produção do cimento Portland e suas abreviações.

Tabela 1: Os óxidos individuais e compostos do clínquer e suas abreviações.

Óxido	Abreviação	Composto	Abreviação
CaO	C	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C ₃ O
SiO ₂	S	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C ₂ O
Al ₂ O ₃	A	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C ₃ A
Fe ₂ O ₃	F	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C ₄ AF

Óxido	Abreviação	Composto	Abreviação
MgO	M	4CaO.3Al ₂ O ₃ .SO ₃	C ₄ A ₃ S̄
SO ₃	S̄	3CaO.2SiO ₂ .3H ₂ O	CSH
H ₂ O	H	CaSO ₄ .2H ₂ O	C \bar{S} H ₂

Fonte: Mehta e Monteiro (2006).

2.1.1 Tipos de cimentos

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (2017), o mercado nacional dispõe de 8 opções, que atendem com igual desempenho aos mais variados tipos de obras. O cimento Portland comum (CP I) é referência, por suas características e propriedades, aos 11 tipos básicos de cimento Portland disponíveis no mercado brasileiro. São eles:

1. Cimento Portland Comum (CP I);
 - a. CP I – Cimento Portland Comum;
 - b. CP I-S – Cimento Portland Comum com Adição;
2. Cimento Portland Composto (CP II);
 - a. CP II-E – Cimento Portland Composto com Escória;
 - b. CP II-Z – Cimento Portland Composto com Pozolana;
 - c. CP II-F – Cimento Portland Composto com Fíler;
3. Cimento Portland de Alto-Forno (CP III);
4. Cimento Portland Pozolânico (CP IV);
5. Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI);
6. Cimento Portland Resistente a Sulfatos (RS);
7. Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação (BC);
8. Cimento Portland Branco (CPB).

O tipo de cimentos são diferenciados de acordo com a proporção de clínquer e sulfatos de cálcio, material carbonático e de adições, tais como escórias, pozolanas e calcário, acrescentadas no processo de moagem. Podem diferir também em função de propriedades intrínsecas, como alta resistência inicial, a cor branca etc. Entre as vantagens obtidas na adição no cimento estão a melhoria de certas características do

concreto e também preservam o meio ambiente ao aproveitar resíduos de outros processos e diminuir a extração de matéria-prima (ABCP, 2017).

O cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI) tem alta reatividade em baixas idades em função do grau de moagem a que é submetido e grau de pureza, proporcionando maior rendimento ao concreto. Ideal para uso em artefatos que exigem o uso de cimentos resistentes à sulfatos, como por exemplo tubos para esgoto. É largamente utilizado em produção industrial de artefatos, concreto protendido pré e pós-tensionado, pisos industriais e argamassa armada (ITAMBÉ, 2017).

Os cimentos de pega rápida tem como objetivo produzir materiais que desenvolvam pega rapidamente e com ganho rápido de resistência de acordo com as exigências necessárias para a sua aplicação. O aumento da finura das partículas atrelado ao maior teor de C_3A , com a quantidade adequada de gesso para promover rápida formação de etringita sem comprometer o ganho de resistência após a pega. A rápida e volumosa formação de etringita será responsável pela pega rápida (ISAIA, 2007).

2.1.2 Calor de Hidratação

A temperatura na massa de estruturas de concreto tem um efeito importante no cronograma de construção e segurança. O principal fator que contribui para o aumento da temperatura na massa de concreto é a evolução do calor devido a uma reação exotérmica do cimento. Entender o mecanismo de geração de calor para cimento é a chave para controlar a temperatura de massa de concreto (KIM, 2010).

Segundo Kim (2010), as reações químicas e os processos físicos do cimento após contato com água determinam as propriedades e o endurecimento do concreto. O calor de hidratação do cimento e sua taxa desempenham papéis fundamentais na determinação da resistência do concreto e durabilidade.

De acordo com Bauer (2000):

Durante o processo de endurecimento do cimento, considerável quantidade de calor se desenvolve nas reações de hidratação. Essa energia térmica produzida é de grande interesse para o engenheiro, principalmente pela elevação de temperatura, resultante nas obras volumosas, a qual conduz o

aparecimento de trinca de contração ao fim do resfriamento da massa (BAUER, 2000).

Para Mehta e Monteiro (2006), existem dois mecanismos de hidratação do cimento Portland, a hidratação através da solução e a hidratação no estado sólido. A hidratação através da solução envolve a dissolução de compostos anidros aos seus constituintes iônicos, formação de hidratos na solução e eventual precipitação, formação de um sólido. Esse mecanismo de hidratação prevê uma reorganização completa dos constituintes dos compostos originais durante a hidratação dos cimentos. A hidratação no estado sólido ocorre diretamente na superfície dos compostos de cimento anidro sem os compostos entrarem em solução.

Devido ao cimento Portland ser composto por uma mistura heterogênea de vários compostos, o processo de hidratação consiste em diversas reações simultâneas dos compostos anidros com a água. No entanto as velocidades de reação não são as mesmas, os aluminatos se hidratam mais rápido do que os silicatos. Logo as características de pega e endurecimentos de uma pasta de cimento são determinadas, principalmente, por reações de hidratação envolvendo os aluminatos (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

De acordo com Suzano e Matto (2014):

Em grandes estruturas de concreto, como em grandes barragens, o calor de hidratação é produzido significativamente mais rápido do que ele pode ser dissipado. E em outros casos pode contribuir, como por exemplo, na concretagem em locais de baixa temperatura, onde possa fornecer energia de ativação para as reações de hidratação (SUZANO; MATTO, 2014).

Segundo Bauer (2000), o valor de hidratação varia de acordo com as proporções de silicato e aluminato tricálcicos, o cimento Portland ordinário varia entre 85 a 100 cal/g, reduzindo-se a 60 a 80 cal/g nos cimentos de baixo calor de hidratação. Na Figura 1 está apresentada a taxa de evolução do calor de pastas de cimento durante o período de pega e endurecimento inicial.

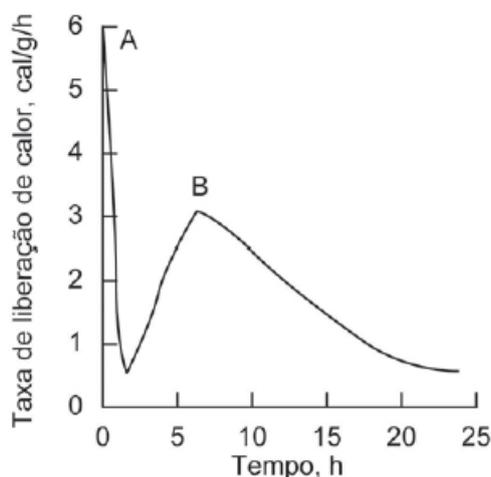


Figura 1: Taxa de liberação de calor de uma pasta de cimento Portland durante a pega e o período inicial de endurecimento.
Fonte: (Mehta; Monteiro, 2006).

Os principais componentes responsáveis pela resistência do cimento hidratado são o C_3S e o C_2S . O C_3S contribui principalmente para a resistência nas primeiras quatro semanas, enquanto o C_2S influencia no desenvolvimento de resistência posterior a esse período. Na idade de um ano, os dois componentes contribuem igualmente para a resistência do cimento hidratado (NEVILLE; BROOKS, 2013).

2.1.3 Método de medição do calor de hidratação

A partir de análises dos dados do calor de hidratação de uma amostra representativa, Verbeck e Foster (1950) calcularam as taxas relativas da evolução do calor em função dos quatro principais compostos do cimento Portland (Tabela 2). O calor de hidratação do cimento pode ser previsto de acordo com a Equação 1 (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

$$H = aA + bB + cC + dD \quad (1)$$

Nessa expressão H representa o calor de hidratação a uma dada idade sob dadas condições; A , B , C , e D são teores percentuais de C_3S , C_2S , C_3A e C_4AF presentes no cimento; e a , b , c e d são coeficientes que representam a contribuição

de 1% do composto correspondente ao calor de hidratação (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Na Tabela 2 está representado o calor de hidratação dos compostos do cimento Portland em diferentes idades.

Tabela 2: Calor de hidratação dos compostos do cimento Portland.

Composto	Calor de hidratação a uma dada idade (cal/g)		
	3 dias	90 dias	13 anos
C ₃ S	58	104	122
C ₂ S	12	42	59
C ₃ A	212	311	324
C ₄ AF	69	98	102

Fonte: Mehta e Monteiro (2006).

2.1.4 Elevação adiabática da temperatura do cimento

A elevação adiabática de temperatura consiste em avaliar a elevação de temperatura do concreto devido ao calor de hidratação gerado do cimento, em condições adiabáticas. Nessa condição não há trocas de calor com o ambiente externo, configura-se um sistema termicamente equilibrado. A norma NBR 12819 padroniza o método pelo qual se executa o ensaio de determinação da elevação adiabática de temperatura em concretos e argamassas (ABNT, 2012)

Segundo essa norma, a máxima temperatura atingida por um concreto em condições adiabáticas depende diretamente da quantidade de aglomerante. Porém outros fatores, como tipo de agregado, teor de pozolana, aditivos, temperatura inicial do concreto, etc, influenciam na evolução da temperatura, podendo ser mais lenta ou mais rápida nas primeiras idades.

Outro fator analisado consiste que em um grande bloco de cimento, no ponto central a dissipação do calor de hidratação do cimento é dificultada pela própria massa de concreto envolvente. Verifica-se que nessa região praticamente não há trocas de calor com o meio externo, acarretando em valores superiores aos alcançados pela região superficial do bloco, cuja temperatura deve estar próxima à do ambiente. Esse

gradiente de temperatura pode provocar tensões de tração no concreto, o que pode levar ao aparecimento de fissuras (ABNT, 2012).

O conhecimento da elevação da temperatura na condição adiabática é de grande importância no estudo das tensões de origem térmica do concreto-massa. É de onde resultam as definições de alturas de camadas de concretagem, intervalo de tempo entre os lançamentos de camadas e pré ou pós-refrigeração do concreto (SUZANO; MATTO, 2014).

De acordo com a NBR 12819 (2012), o corpo de prova deve ser moldado em um única betonada. O cálculo das elevações de temperatura, em °C, em cada leitura deve ser feito utilizando a Equação 2.

$$E = T_i - T_{cf} \quad (2)$$

Onde:

E é a elevação adiabática da temperatura do concreto, em °C;

T_i é a temperatura lida no intervalo considerado, em °C;

T_{cf} é a temperatura do concreto fresco no início do ensaio, em °C.

2.1.5 Equação de transmissão de calor

Para que haja troca de calor, o conjunto é composto pelo sistema e pelo ambiente. Nesse caso tanto a temperatura do ambiente como do sistema são diferentes e variam até que as duas se igualem e o equilíbrio térmico seja estabelecido. Essa variação de temperatura se deve a uma troca de energia térmica do sistema e o ambiente. Em analogia, o concreto de cimento Portland através de reações exotérmica eleva sua temperatura, o sistema, e dissipa para o ambiente, em sistema aberto. A energia transferida é chamada de calor e simbolizada pela letra Q, conforme Equação 3 (HALLIDAY; RESNICK, 2009).

$$Q = c \times m \times \Delta T \quad (3)$$

Onde

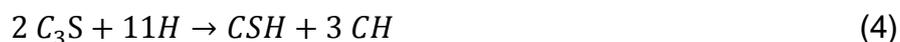
c é a calor específico (cal/g^o.C);

m é a massa de material (g);

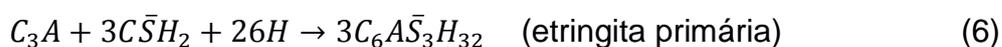
ΔT é a variação de temperatura (°C).

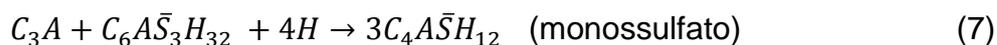
2.2 COMPOSIÇÃO DOS CIMENTOS

O cimento Portland é composto em grande parte de quatro tipos de minerais: silicato tricálcico (C₃S), silicato dicálcico (C₂S), aluminato tricálcico (C₃A) e ferro aluminato tetracálcico (C₄AF). Quando esses minerais e a água são misturados, os produtos de hidratação são formados. Os silicatos de cálcio consistem em silicato tricálcico e silicato dicálcico. Os dois silicatos de cálcio induzem reações de hidratação muito semelhantes. As Equações 4 e 5 descrevem a reação de hidratação de silicatos de cálcio. O produto de hidratação principal é o silicato de cálcio hidratado (CSH) e hidróxido de cálcio (CH). O gel CSH desempenha o papel de um ligante da pasta de cimento e tem um efeito sobre a resistência e durabilidade do concreto (KIM, 2010).



O aluminato tricálcico (C₃A) reage imediatamente com água. A rápida hidratação do C₃A pode ser retardada pela adição de gesso. Portanto, os produtos finais da hidratação variam com o teor de gesso. Os produtos da hidratação de C₃A são normalmente formados a etringita primária e monossulfato mais tarde (Equação 6). A precipitação de etringita primária (C₆A \bar{S} ₃H₃₂) contribui para endurecimento, ou seja, a pega. Depois do esgotamento do sulfato (SO₄), a etringita torna-se instável e gradualmente convertida em monossulfato (Equação 7). Se uma nova fonte de sulfato é adicionada, monossulfato pode converter para etringita novamente. O aluminato tricálcico (C₃A) contribui pouco para a resistência da pasta de cimento (KIM, 2010).





A hidratação do ferro aluminato tetracálcico (C_4AF) é semelhante aos produtos de hidratação de C_3A . As reações de hidratação são mais lentas e envolvem menos calor. Dois possíveis hidratos podem se formar dependendo da disponibilidade de gesso (Equação 8 e 9), com estrutura semelhante ao monossulfato e a estringita (KIM, 2010).



2.2.1 Pega dos cimentos

Segundo Bauer (2000), o fenômeno da pega do cimento compreende a evolução das propriedades mecânicas da pasta no início do processo de endurecimento, propriedade essencialmente físicas, conseqüente, entretanto, a um processo químico de hidratação. É um fenômeno artificialmente definido como o momento em que a pasta adquire certa consistência que a torna imprópria a um trabalho. Tal conceituação se entende, evidentemente tanto à argamassa quanto aos concretos nos quais a pasta de cimento está presente e como missão aglutinadora dos agregados.

No processo de hidratação, os grãos de cimento que inicialmente se encontram em suspensão vão se aglutinando paulatinamente uns aos outros por efeito de floculação conduzindo à construção de um esqueleto sólido, finalmente responsável pela estabilidade da estrutura geral. A pega e o endurecimento são dois aspectos do mesmo processo de hidratação do cimento, visto em períodos diferentes: a pega na primeira fase do processo e o endurecimento posteriormente. A partir de um certo tempo após a mistura, quando o processo de pega alcança determinado estágio, a pasta não é mais trabalhável, não admite operação de remistura. Tal

período de tempo constitui o prazo disponível para as operações de manuseio das argamassas e concretos, após o qual esses materiais devem permanecer em repouso, em sua posição definitiva, para permitir o desenvolvimento do endurecimento (BAUER, 2000).

De acordo com Neville e Brooks (2013):

Genericamente falando, pega se refere à mudança de estado fluido para o rígido. A pega é causada principalmente pela hidratação do C_3A e C_3S e é acompanhada pela elevação da temperatura na pasta de cimento. O início de pega corresponde a uma rápida elevação e o fim de pega corresponde ao pico de temperatura (NEVILLE; BROOKS, 2013).

De acordo com Petrucci (1980), em alguns cimento há o fenômeno chamada de falsa pega, que consiste em iniciar-se a pega poucos minutos após a adição de água. E Neville e Brooks (2013) complementa que nessa falsa pega não há liberação de calor e o concreto pode ser remisturado sem a adição de água.

A medida do tempo de pega é obtida utilizando o aparelho de Vicat (Figura 2) formado por um tronco de cone, de altura 4 cm e diâmetro de 8 cm, e agulha de 1 mm de diâmetro, na qual a pasta de cimento de consistência normal é aplicada. A consistência normal é determinada com a sonda Tetmayer, de formato cilíndrico de diâmetro de 1 cm. A sonda é colocada sobre a pasta sem choque e sem velocidade inicial ao estacionar a 6 mm do fundo da forma obtemos a pasta de consistência normal. O tempo de início de pega é o tempo que decorre desde a mistura do cimento com a água até a agulha de Vicat aplicada sem choque e sem velocidade, estacionar a 1 mm do fundo. E o fim de pega é o tempo que decorre desde a mistura do cimento com a água até o momento que a agulha, aplicada sobre a superfície da pasta, não deixa vestígios visíveis (PETRUCCI, 1980).

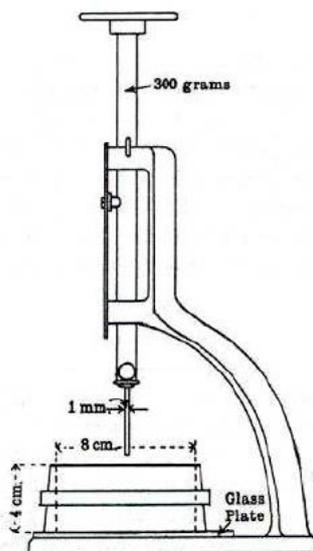


Figura 2: Esquema do aparelho de Vicat.
Fonte: Materiais de Construção (Bauer 2000).

Segundo Metha e Monteiro (2006), o termo pega refere-se à solidificação das pasta de cimento. O início de pega marca o momento que a pasta se torna não trabalhável. Da mesma maneira, as operações como: lançamento, compactação e acabamento do concreto, tornam-se de difícil execução. O tempo que leva para solidificar completamente é denominado tempo de fim de pega, que não deve ser muito longo para evitar atrasos no processo de construção.

2.2.2 Determinação da consistência normal

A determinação da consistência normal é normatizada pela NBR 16606 (ABNT, 2017) - Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal. A aparelhagem necessária para o ensaio é: uma balança com sensibilidade mínima de 0,1 g, um misturador de pasta de cimento, uma espátula metálica, um cronometro e o aparelho de Vicat. Inicialmente o laboratório deve ser mantido a uma temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ e umidade relativa maior que 50%. Todos os aparelhos e materiais devem estar na mesma temperatura do laboratório no momento que foram usados.

O aparelho de Vicat, provido da sonda Tetmayer deve ser ajustado descendo a sonda até a placa base e zerado a escala. De acordo com a NBR 16606 (ABNT, 2017) a amostra deve ser ensaiada conforme foi recebida, a menos que apresente

corpos estranhos ao material, neste caso amostra deve ser peneirada em peneira de abertura 150 μm . A massa de cimento a ser utilizada na preparação da pasta deve ser de $(500,00 \pm 0,5)$ g e a massa de água deve ser determinada por tentativas com precisão de 0,5 g.

O procedimento inicia-se com o misturador parado, verte-se a água na cuba e adiciona-se o cimento, permanecendo em repouso por 30 s. Em seguida o misturador é ligado em velocidade lenta por 30 s. Desligado, em seguida, para raspagem da cuba por 30 s e novamente ligado em velocidade rápida por 60 s. A pasta resultado da mistura deve ser vertida no molde com sua base apoiada sobre a placa-base com o auxílio da espátula e rasada. O molde deve ser colocado sob o aparelho de Vicat, a sonda desce até a superfície da pasta, sem que haja contato, nesse momento a sonda é solta e após 30 s realizada a leitura. A pasta é considerada normal quando a sonda situar-se a uma distância de (6 ± 1) mm da placa-base. Caso não obtenha esse resultado, devem ser preparadas outras pastas de ensaio, variando a quantidade de água (ABNT, 2007).

Segunda a NBR 16606 (2017), a quantidade de água necessária à obtenção da consistência normal da pasta de cimento é calculada pela Equação 10.

$$A = \frac{m_a}{m_c} \times 100 \quad (10)$$

Onde

A é a quantidade de água, expressa em porcentagem (%);

m_a é a massa de água utilizada para obtenção da consistência normal da pasta de cimento, expressa em gramas (g);

m_c é a massa de cimento utilizada no ensaio, expressa em gramas (g).

2.3 A TERMORGRAFIA

De acordo com Takeda (2015):

A termografia é uma técnica de inspeção não destrutiva e não invasiva que tem como base a detecção da radiação infravermelha emitida naturalmente,

por excitação de uma fonte da natureza ou artificialmente produzida, pelos corpos com intensidade proporcional à sua temperatura. Através dessa técnica é possível identificar regiões, ou pontos, onde a temperatura está alterada com relação a um padrão preestabelecido. É baseada na medida da radiação eletromagnética emitida por um corpo a uma temperatura acima do zero absoluto. A radiação eletromagnética de um corpo se dá devido à agitação de átomos e moléculas dos quais são constituídos (BAUER 2013, *apud* TAKEDA, 2015).

Segundo Moropoulou *et al.* (2013), para a interpretação dos termógrafos obtidos, tem a necessidade de considerar as várias propriedades físicas de uma estrutura. Esses incluem as propriedades espectrais dos materiais (emissividade, absorção, reflexão e transmissão), suas propriedades térmicas (condutividade, difusividade, efusividade e calor específico) e outras propriedades tais como porosidade, massa volumétrica, conteúdo de água aprisionada. Entretanto, os dados citados nem sempre estão disponíveis para materiais históricos de construção. Por exemplo, um material com vazios ou poros, diminui sua condutividade térmica e densidade, sua difusividade térmica é alterada e assim a condução da transferência de calor dentro do material é afetada. Além disso, quando o material investigado contém umidade, suas propriedades ópticas são alteradas, a densidade, a capacidade calorífica específica e a condutividade térmica também são. Qualquer mudança de temperatura é muito mais lenta em uma área úmida.

O princípio básico da técnica é que, uma vez que todos os objetos acima da temperatura zero absoluto (0 K) emitem radiação infravermelha, é possível detectar e mapear variações e correlacioná-las com variações dos materiais, propriedades, microestrutura e morfologia superficial. As variações térmicas são medidas com a ajuda de câmeras de infravermelhos. Das abordagens em investigação em termografia infravermelha, a termografia passiva é usada quando as características de interesse são naturalmente a uma temperatura diferente do que a de fundo. No entanto, quando as características de interesse estão em equilíbrio térmico com os arredores, e assim difícil de diferenciar, a termografia ativa é empregada, onde uma fonte de energia é utilizada para produzir um contraste térmico (aquecimento ou arrefecimento) entre a característica de interesse e o substrato. (MOROPOULOU *et al.*, 2013).

Segundo Tipler e Mosca (2009), temperatura, reconhecida cognitivamente como o nível de calor que existe no ambiente, resultante, por exemplo, da ação dos raios solares ou nível de calor existente num corpo. Essa temperatura é explicada pela Física como a grandeza termodinâmica intensiva comum a todos os corpos que estão em equilíbrio térmico e o calor é a energia cinética das moléculas que compõe a substância.

A radiação infravermelha não pode ser detectada pelos olhos humanos, portanto, a câmera infravermelha tem por função adquirir e processar estas informações apresentando imagens que descrevem as variações de temperatura nos objetos alvo (FLIR, 2012).

As propriedades radioativas dos objetos geralmente são descritas em relação a um corpo negro perfeito, ou seja, um emissor/absorvedor perfeito de energia radiante. No mundo real, não há objetos emissores/absorvedores perfeitos, no entanto é possível encontrar objetos com propriedades bem próximas destas características (FLIR, 2012).

Considerando que a energia emitida por um corpo negro perfeito é denotada por W_{bb} e que a de um objeto normal na mesma temperatura é W_{obj} , a razão entre estes dois valores descreve a emissividade ε deste objeto, como indicado na Equação 11.

$$\varepsilon = \frac{W_{obj}}{W_{bb}} \quad (11)$$

Então, a emissividade é um valor que varia de 0 até 1 e quanto melhor forem as propriedades radiantes do objeto, maior é a sua emissividade.

Um objeto que tenha a mesma emissividade em todos os comprimentos de onda é chamado de corpo cinza. A energia da emissão destes corpos é determinada através da Lei de Stefan-Boltzmann's pela Equação 12:

$$W = \varepsilon \sigma T^4 \quad (12)$$

Onde ε é a emissividade do objeto, σ é a constante de Stefan-Boltzmann's e T é a temperatura. Logo, a energia da emissão da radiação infravermelha destes

corpos é igual a de um corpo negro perfeito reduzida proporcionalmente ao valor da emissividade do objeto.

Desta forma, a grande maioria dos objetos não são nem corpos negros perfeitos ou corpos cinzas perfeitos, pois a emissividade varia com o comprimento de onda. Como as câmeras termográficas operam apenas dentro de comprimentos limitados do espectro, na prática, é possível tratar os objetos analisados como corpos cinzentos com emissividade constante (FLIR, 2012).

Outro fator a ser considerado é que entre a câmera infravermelha e o objeto observado se encontram na atmosfera que tende a atenuar a radiação devido a absorção de parte desta energia pelos gases que a constituem e também por partículas dispersas no meio. O valor desta atenuação depende muito do comprimento de onda da radiação. Esta interferência da atmosfera é similar à que ocorre com o espectro visível; assim como ocorre com a luz visível, nevoeiros, nuvens, chuva e neve podem impedir a visualização de objetos mais distantes e este princípio se aplica também a radiação infravermelha (FLIR, 2012).

A radiação que chega às lentes da câmera infravermelha vem de diferentes fontes. Além da radiação do objeto em análise, as lentes da câmera recebem radiações do ambiente do entorno que são refletidas na superfície do objeto. Estes dois componentes da radiação também são atenuados pela atmosfera que, também absorve e emite de maneira própria parte desta radiação (FLIR, 2012).

Dadas estas premissas, a radiação total recebida pela câmera pode ser escrita conforme a Equação 13:

$$W_{tot} = \varepsilon\tau W_{obj} + (1 - \varepsilon)\tau W_{amb} + (1 - \tau)W_{atm} \quad (13)$$

Onde ε é a emissividade do objeto, T é a transmissão através da atmosfera, W_{amb} é a energia efetiva do ambiente no entorno do objeto (ou a energia refletida pelo ambiente) e W_{atm} é a energia presente na atmosfera entre o objeto e a câmera.

Na Figura 3, estão representadas as fontes de energia detectadas durante a medição termográfica e a sua influência na medida da energia do objeto (FLIR, 2012).

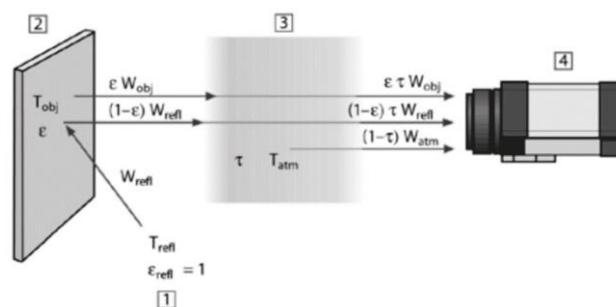


Figura 3: Representação esquemática da situação da medição termográfica geral. 1: Meio adjacente; 2 Objeto; 3: Atmosfera; 4: Câmera

Fonte: FLIR (2012).

Para obter a temperatura correta do objeto em análise, o *software* da câmera infravermelha necessita que sejam realizadas as entradas corretas dos valores de emissividade dos materiais e condições do ambiente. Os valores de emissividade (ϵ), da temperatura ambiente e da umidade relativa devem ser inseridos pela interface do equipamento para que o software realize os demais cálculos necessários à correção das leituras. Geralmente, os *softwares* embarcados nas câmeras infravermelhas já possuem alguns destes parâmetros disponíveis para consulta, no entanto, dependendo das circunstâncias, estes fatores podem ser medidos, assumidos ou encontrados em tabelas fornecidas no manual do equipamento ou em literatura especializada (TAKEDA, 2015).

Caso estes parâmetros não sejam adequados às condições ambientais e aos materiais dos objetos analisados, os termogramas não irão representar as temperaturas reais dos objetos analisados, no entanto, os gradientes de temperatura das superfícies observados nestes termogramas são claramente identificáveis, só que em um intervalo de temperaturas diferente (FLIR, 2012).

As principais especificações técnicas do equipamento são apresentadas no Quadro 2:

Modelo	FLIR E60
Resolução IR	320 x 240 pixels
Resolução da Câmera Digital	3,1 MP
Sensibilidade térmica	< 0,05 °C
Precisão	± 2 °C ou ± 2% de leitura
Faixa de temperatura	(-20 °C a 650,00 °C)
Faixa espectral	7,5 a 13 μm

Campo de visão (FOV)	25°
Foto	Manual
Micro bolômetro não refrigerado	LWIR (Long Wave Infra Red)
Display Colorido	3,5" (320 x 240)
Frame Rate	60 Hz
Pontos móveis de medição	3
Formato do arquivo (Termograma)	Radiometric JPG

Quadro 1: Especificações técnicas Câmera Infravermelha FLIR E60.
Fonte: FLIR – Manual da Câmera Infravermelha modelo E60 (2012).

2.3.1 Termografia na construção civil

Nas investigações de patologias com enfoque em construções históricas, as dificuldades associadas com a acessibilidade e a coleta irreversível de amostras destrutivas em monumentos, não permitem a utilização da grande variedade de técnicas analíticas disponíveis. No entanto o uso de Técnicas Não Destrutivas (TND), como a termografia, podem ser aplicadas *in situ* e não requerem amostragem destrutiva. Essas técnicas são indispensáveis para proteção, caracterização dos materiais, detecção de seus desgastes e degradação, avaliar a eficácia das intervenções, e avaliar a compatibilidade de matérias e processos aplicáveis. (MOROPOULOU *et al*, 2013).

No monitoramento do concreto endurecido, a termografia possibilitou a verificação da hidratação do cimento, verificando sua viabilidade para validar resultados obtidos do código do elemento finito implementado para previsão do desenvolvimento da temperatura nas estruturas de concreto nas primeiras idades, responsável pela influência do calor de hidratação do cimento. A coleta de imagem a cada instante a partir de um elemento de concreto é um instantâneo das temperaturas de superfície (AZENHA; FARIA; FIGUEIRAS, 2011).

Segundo Washer, Fenwich e Nelson (2013), essa tecnologia tem sido tradicionalmente aplicada a plataformas de pontes, que são expostas ao aquecimento radiante do sol que ajuda a desenvolver os gradientes térmicos necessários no concreto e para o estudo. No entanto para as áreas sombreadas das pontes, as transferências de calor ocorrem de forma convectiva, os gradientes térmicos são desenvolvidos em menor magnitude que a gerada pelo aquecimento radiante do sol. A termografia tem o potencial de detectar deslaminamentos no subsolo antes de

desenvolver o deslocamento e poderia ser usado como uma ferramenta para melhorar a inspeção visual de pontes de concreto.

Ainda segundo Washer, Fenwich e Nelson (2013), as imagens térmicas para a inspeção de áreas sombreadas de estruturas de pontes, tais como: superestrutura e componentes da subestrutura são utilizadas para modelar o comportamento de danos subterrâneos no concreto como um meio de avaliar as condições ambientais necessárias para que a inspeção ocorra. Para isso, são necessários altas variações diurnas na temperatura ambiente para permitir a detecção de danos no subsolo (delaminação) em concreto usando termografia infravermelho.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esse trabalho consistiu em determinar o tempo de início e fim de pega dos cimentos, comparando os resultados obtidos utilizando a técnica normatizada através do uso do aparelho de Vicat com os resultados da termografia e do calorímetro.

Nesse experimento foi utilizado o cimento tipo V-ARI, variando a relação água/cimento, 0,2; 0,4 e 0,6 e também foi realizado para a consistência normal.

3.1 ESPECIFICAÇÕES DA CÂMERA INFRAVERMELHA

A câmera infravermelha (Termovisor) utilizada nas inspeções será da marca FLIR, modelo E60 (Figura 4). Os parâmetros de calibração personalizáveis da câmera consistem na emissividade, temperatura ambiente, temperatura refletida, umidade relativa do ar e distância ao objeto.

A câmera infravermelha capta os raios infravermelhos emitidos pelas superfícies analisadas e, com base nos parâmetros de entrada, processa estas informações através da Equação 13, descrita anteriormente, formando os termogramas que são representações gráficas das temperaturas superficiais.



Figura 4: Câmera Infravermelha FLIR E60
Fonte: FLIR – Manual da Câmera Infravermelha modelo E60 (2012)

3.2 CONFECÇÃO DO CALORÍMETRO

Para a realização do trabalho foi necessário confeccionar um calorímetro partindo de um bloco de isopor.

3.2.1 Materiais utilizados

Para a fabricação do calorímetro foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Bloco de isopor 50x50x50 cm;
- Sistema Arduido composto por visor de 4 linhas;
- 4 sensores de temperatura de precisão de 0,2 °C;
- 4 recipientes plásticos com tampa de rosca;
- Chapa de madeira MDF de 6 mm e 3 mm.

3.2.2 Procedimentos

Partindo do bloco de isopor 50x50x50 cm foi retirado com um serrote uma placa com altura de 10 cm em uma das faces, para servir de tampa para o calorímetro. As faces rústicas foram posicionadas para o exterior, mantendo assim, a face mais lisa e regular do isopor na parte interna, o que permite um contato direto da bloco restante com a tampa, minimizando as perdas de calor.

Na face 50x50 regular do bloco restante, foram realizados 4 furos de 6 cm de diâmetro e 5 cm de profundidade. Esses orifícios foram lixados para facilitar a colocação dos recipientes plásticos.

Em um segundo momento, foi instalado o sistema Arduino já configurado para mostrar no visor digital as temperaturas captadas pelos sensores, alojados dentro dos potes plásticos, e salvá-las em um micro SD um arquivo de dados com as temperaturas a cada minuto obtidas em cada recipiente. Para essa instalação foram realizados sulcos na superfície do bloco para a penetração dos fios dos sensores, impedindo que haja uma elevação da superfície que impeça o lacre com a tampa, que acarretaria na perda de calor.

Na Figura 5 (a) observa-se o calorímetro já com os orifícios com os recipientes com os sensores. Nessa figura é possível visualizar a placa do sistema Arduino e na Figura 5 (b) é uma vista superior na qual é possível ver os orifícios e o cabeamento do sistema.



Figura 5: (a) Calorímetro inacabado e (b) Vista superior do calorímetro inacabado.
Fonte: A autora.

Com o sistema já instalado, foi iniciado o processo de confecção da caixa de madeira para proteger o equipamento. Para isso foi colado o feltro sintético na cor preta na face superior do bloco, dentro dos orifícios e na face da tampa que entra em contato com a face superior do bloco. Em segundo passo, foram coladas e parafusadas as placas de MDF de 6 mm já recortadas no tamanho da caixa e também as placas de 3 mm, que estão protegendo a parte eletrônica do calorímetro. Na Figura 6 observa-se o calorímetro já finalizado.



Figura 6: O calorímetro em funcionamento.
Fonte: A autora.

3.3 PREPARAÇÃO DA PASTA

Inicialmente o laboratório foi climatizado mantendo temperatura constante em todos os ensaios em 22°C. No segundo momento foram pesadas 3 amostras de 600g de cimento CP V e a quantidade necessária de água para cada relação a/c. Nesse primeiro ensaio foram realizados as relações de 0,2; 0,4 e 0,6.

O cimento foi misturado a água manualmente e resultado vertido em dois recipientes. Com a câmera infravermelha foi possível filmar o momento da mistura e obter a temperatura inicial. Parte da amostra foi designada para o ensaio normatizado utilizando o aparelho de Vicat de acordo com a norma NBR 16607 (2017). A outra parte da amostra foi inserida no recipiente contendo o sensor de temperatura do calorímetro. Esse procedimento foi realizado para as três relações água/cimento.

Para a relação a/c de 0,6 foram pesados 600g de cimento e 360g de água na balança de precisão de 0,1 g, Figura 7 (b), a mistura foi inserida no molde utilizado no aparelho de Vicat, Figura 7 (a), e 120,5 g da mistura colocada no recipiente do calorímetro, o que corresponde a 75 g de cimento e 45,5 de água. Para a relação de 0,4 foram pesados 600 g de cimento e 240 g de água, a mistura foi inserida no molde e 54,5 g foram colocadas no recipiente do calorímetro, totalizando 39 g de cimento e 15,5 g de água. E para a amostra de relação de 0,2 foram pesados 600 g de cimento e 120 g de água. Sendo que 64,6 g foram inseridas no recipiente do calorímetro, que corresponde a 54 g de cimento e 10,6 de água e o restante colocado no molde do aparelho de Vicat.

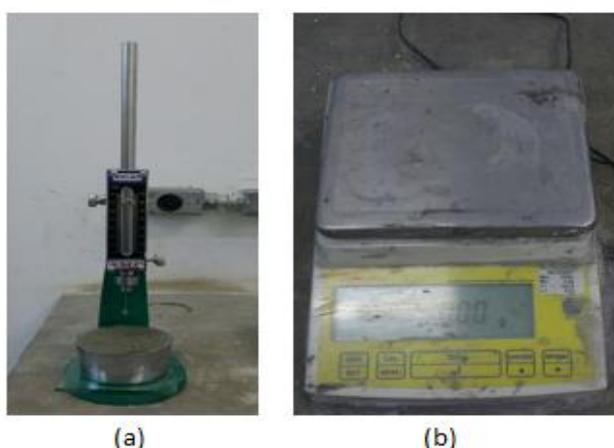


Figura 7: (a) Aparelho de Vicat com o molde preenchido de pasta de cimento e (b) Balança de precisão de 0,1 g.

Fonte: A autora.

Em um segundo ensaio, foi obtida a pasta de consistência normal segundo NBR 16606 (2017), com quantidade de água de 32%. Com uma pasta de mesma consistência foi realizado o ensaio de Vicat, o monitoramento do calor de hidratação com o calorímetro e com o termografia. Para esse ensaio foram pesadas 500 g de cimento e 160 g de água, a pasta de cimento formada foi inserida no molde utilizado pelo aparelho de Vicat, 91 g dessa mistura foram inseridas no calorímetro sendo 69 g de cimento e 22 g de água. O restante foi colocado em uma capsula para ser monitorado pela câmera infravermelha.

Para obter a quantidade de calor, Q , devido ao calor de hidratação utilizou-se a Equação 3, onde o calor específico dos cimentos foi considerado de $0,2 \text{ cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Foi utilizado o aparelho de Vicat como forma de comparar os resultados obtidos com os outros equipamentos em todas as consistências analisadas.

4.1 RESULTADOS DO ENSAIO DE VICAT

No ensaio de Vicat, com relação água/cimento de 0,20; 0,40; 0,60 e a da consistência padrão encontrada de 0,32 foram obtidos os resultados representados na Tabela 3, dos tempos de início e fim de pega dos cimentos.

Tabela 3: Tempo de início e fim de pega dos cimentos.

<i>Relação Água/Cimento</i>	<i>Início de pega</i>	<i>Fim de Pega</i>
0,20	1 h 28 min	-
0,32	3 h 37 min	5 h 34 min
0,40	4 h 47 min	6 h 47 min
0,60	7 h 45 min	9 h 07 min

Fonte: A autora.

Não foi possível determinar o fim de pega com relação a/c de 0,20 devido ao estado físico dessa amostra, que apresentava-se pouco aglutinada, formando pequenas porções dispersas, tornando possível apenas identificar o início de pega. Com relação a esse aspecto, o aparelho de Vicat somente é normatizado para determinar os tempos de pega da pasta de consistência padrão.

Conforme o aumento da quantidade de água existente para as reações de hidratação dos compósitos aumenta também o início de pega, a relação de 0,20 teve o início de pega depois de decorrido 1 h 28 min da mistura de água com o cimento, já amostra de 0,60 o início só ocorreu após às 7h 45 min. A amostra de 0,60 teve velocidade da reação de hidratação 5x menor comparada com a velocidade da reação da relação de 0,20. Um dos fatores está na quantidade de cimento hidratada, visto que para a relação de 0,20, a hidratação do cimento foi parcial, o que também impossibilitou obter o fim de pega da relação de 0,20. Já para a relação de 0,60 a quantidade de água utilizada foi superior a necessária para hidratar a porção de

cimento usada, o que acarretou na abundância de água nos capilares da pasta de cimento, levando, portanto, mais tempo para endurecer.

A relação água/cimento obtida da consistência de normal de 0,32 se aproxima da consistência obtida pela fabricante do cimento utilizado. De acordo com relatório de ensaios referentes a outubro de 2017, no ensaio de obtenção de consistência normal foi obtido em média a relação água/cimento de 30,7%.

Nesse mesmo relatório em média o resultado obtido para início de pega foi de 3 h 36 min, com o intervalo da amostra de 3 h 10 min à 3 h 45 min. O início de pega, 3 h 37 min, obtido nesse experimento está dentro do intervalo desse relatório. No entanto, o fim de pega, 5h 34 min, ficou superior ao obtido pela cimenteira que em média foi de 4 h 07 min, com intervalo de 4h 00 min à 4 h 30 min. Esse aumento do tempo de fim de pega se deve principalmente as condições de umidade do ar, temperatura, experiência do laboratorista, que esse último influência diretamente o resultado, esses dados não foram fornecidos pela fabricante.

4.2 RESULTADOS DO ENSAIO COM CALORIMETRO

No ensaio utilizando o calorímetro foram obtidas as temperaturas por minuto das amostras de 0,2; 0,4 e 0,6 nas primeiras 70 h após a mistura. E para amostra de consistência normal com relação a/c de 0,32 nas primeiras 27 horas.

A evolução de calor após a mistura de água e cimento, corresponde a dissolução de aluminatos e sulfatos, não foi possível identificar com o calorímetro visto que a mistura ocorreu fora do recipiente e o sensor passou a identificar a mistura minutos após a mistura. O próximo ciclo de evolução, que culmina no pico observado pelo calorímetro, corresponde ao calor de formação da etringita, acredita-se também que esse período corresponde ao calor de dissolução do C_3S e o calor de formação do CSH (MEHTA e MONTEIRO, 2006).

A temperatura no primeiro dia de ensaio, apresentada no Gráfico 1, dentro do recipiente vazio no calorímetro oscilou consideravelmente dentro do intervalo de 21 °C à 24,5 °C.

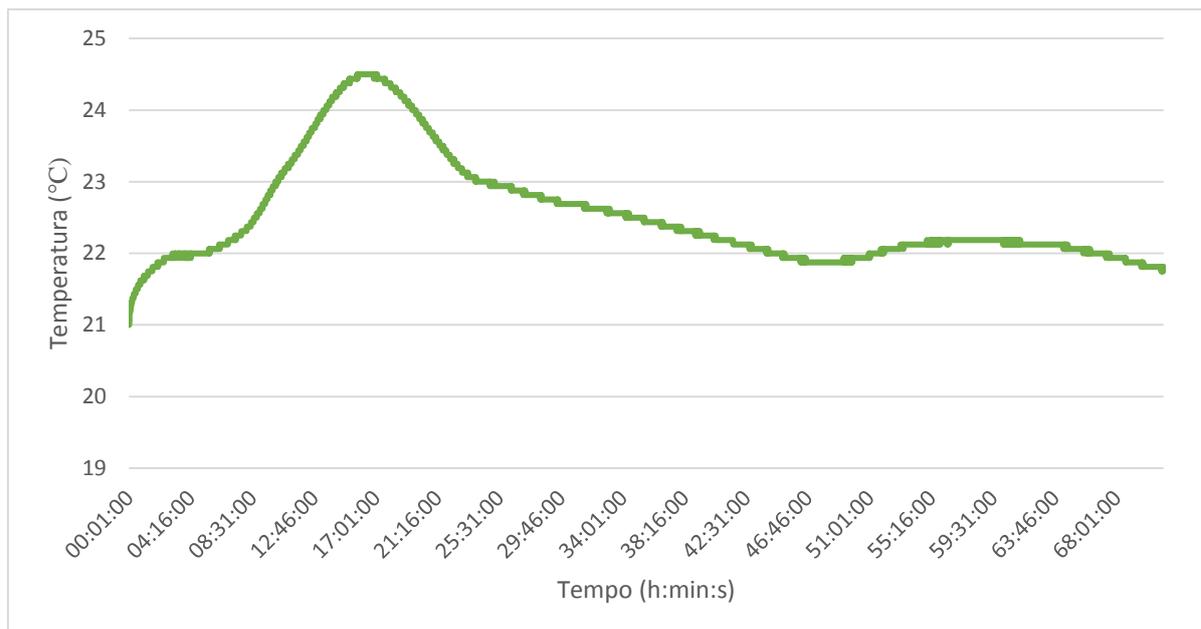


Gráfico 1: Temperatura no calorímetro no segundo dia de ensaio.
Fonte: A autora.

No Gráfico 2 está plotado a oscilação de temperatura no segundo dia, atingindo no máximo 22,87 °C e no mínimo 21,12 °C.

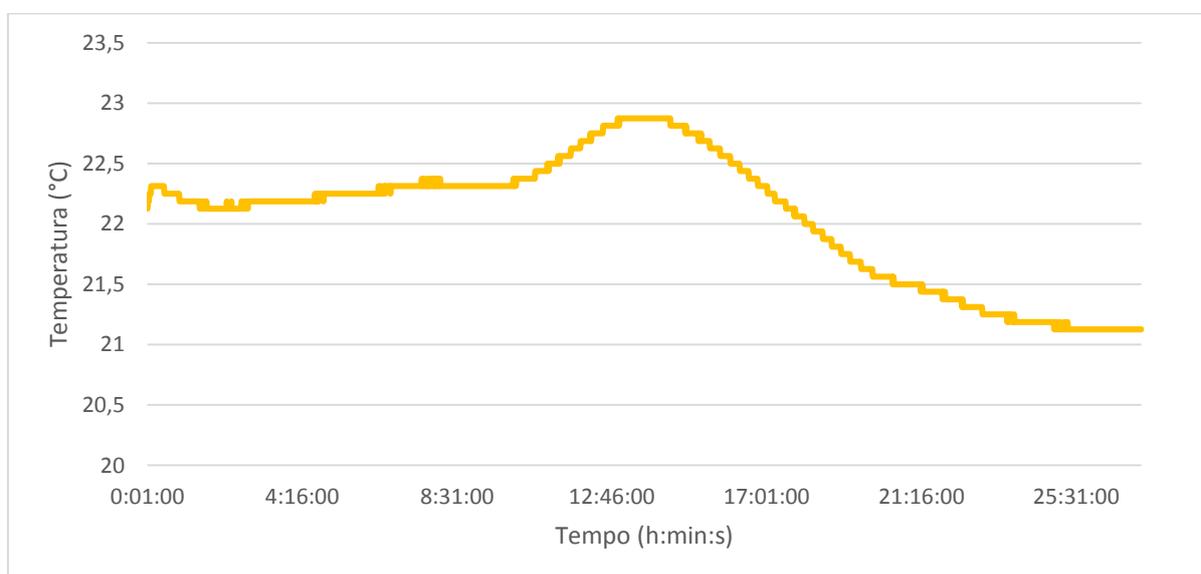


Gráfico 2: Temperatura no calorímetro no segundo dia de ensaio.
Fonte: A autora.

Não foi possível identificar a origem da oscilação de temperatura, no primeiro dia de ensaio, visto que não houve aquecimento da placa do sistema Arduino, a temperatura do laboratório permanece constante e foi utilizado o mesmo sensor para os dois dias de ensaio, para verificar a temperatura no interior do calorímetro.

O Gráfico 3 corresponde a de relação a/c de 0,6; sensor 1 do calorímetro. A curva começa ascender em torno das 7 h 39 min, 25,62 °C, libera calor de 0,9 cal/g de cimento, esse tempo decorrido corresponde ao tempo de início de pega, já o pico dessa curva acontece às 14 h 30 min com temperatura máxima de 44,62 °C e liberação de 4,7 cal/g. O tempo de início de pega encontrado pelo calorímetro é semelhante ao encontrado pelo aparelho de Vicat de 7 h 45 min, no entanto o tempo de fim de pega não foi possível identificar pelo calorímetro, o tempo dado pelo Vicat de 9h 07 min com liberação de 1,5 cal/g encontra-se no primeiro 1/3 da ascensão da curva e não no pico.

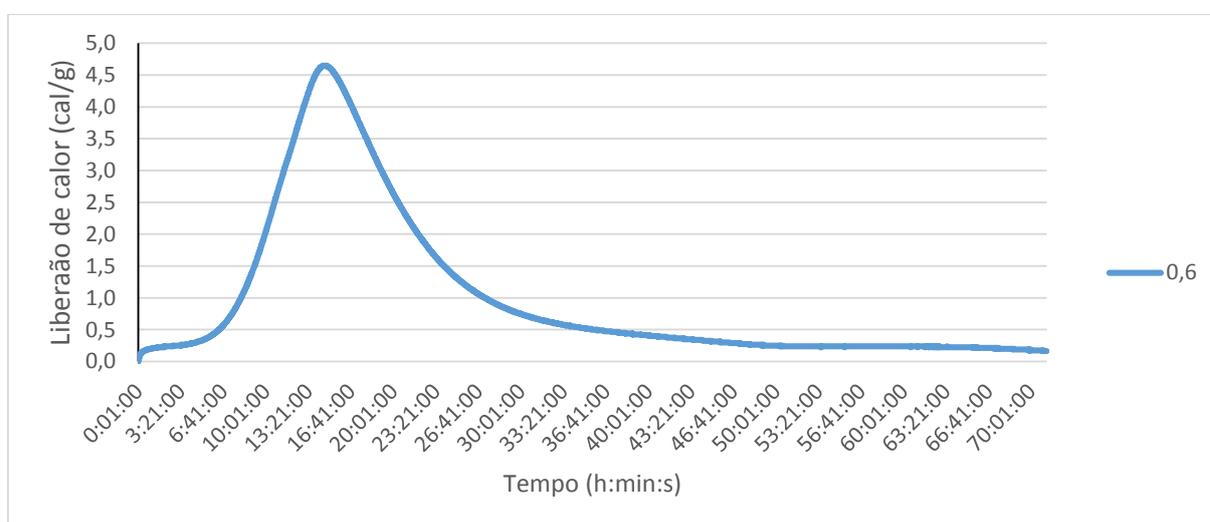


Gráfico 3: Liberação de calor da amostra de 0,6 relação água/cimento.
Fonte: A autora.

No Gráfico 4 está representada a curva da relação a/c de 0,4; sensor 2 do calorímetro. O tempo de início de pega é dada entorno das 4 h 35 min, 23,0 °C, liberando calor de 0,3 cal/g de cimento, no momento que a curva começa a ascender, Já o tempo de final de pega dessa curva acontece às 13 h com temperatura de 33,37 °C, no ponto máximo da curva e liberação de 2,4 cal/g. Ao analisar o tempo de início de pega obtido pelo calorímetro nota-se o quão próximo ficou do encontrado pelo aparelho de Vicat de 4 h 47min. O tempo de pega de 6 h 47 min obtido pelo Vicat não foi possível identificar no calorímetro, nesse tempo ocorre a liberação de 0,5 cal/g e encontra-se no começo da ascensão da curva próximo ao início da pega.

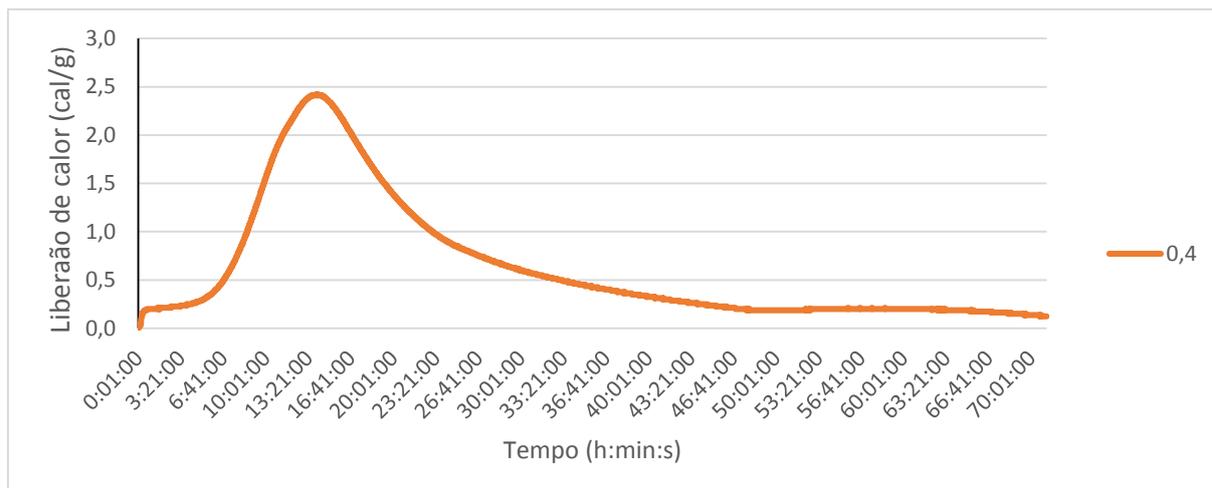


Gráfico 4: Liberação de calor da amostra de 0,4 relação água/cimento.
Fonte: A autora.

No Gráfico 5 está traçada a curva da relação a/c de 0,2; sensor 3 do calorímetro. O tempo de início de pega dessa amostra ocorreu por volta da 1 h 26 min, 22,65 °C, com liberação de calor de 0,3 caloria por grama de cimento, no momento que a curva começa a subir. O ponto máximo dessa curva acontece às 12 h 21 min com temperatura de 33,12 °C com liberação de 2,4 cal/g. Ao analisar o tempo de início de pega obtido pelo calorímetro nota-se o quão próximo ficou do encontrado pelo aparelho de Vicat de 1 h 28 min. O tempo final de pega dessa amostra não foi possível comparar com o obtido pelo Vicat já que o ensaio não foi possível identificar.

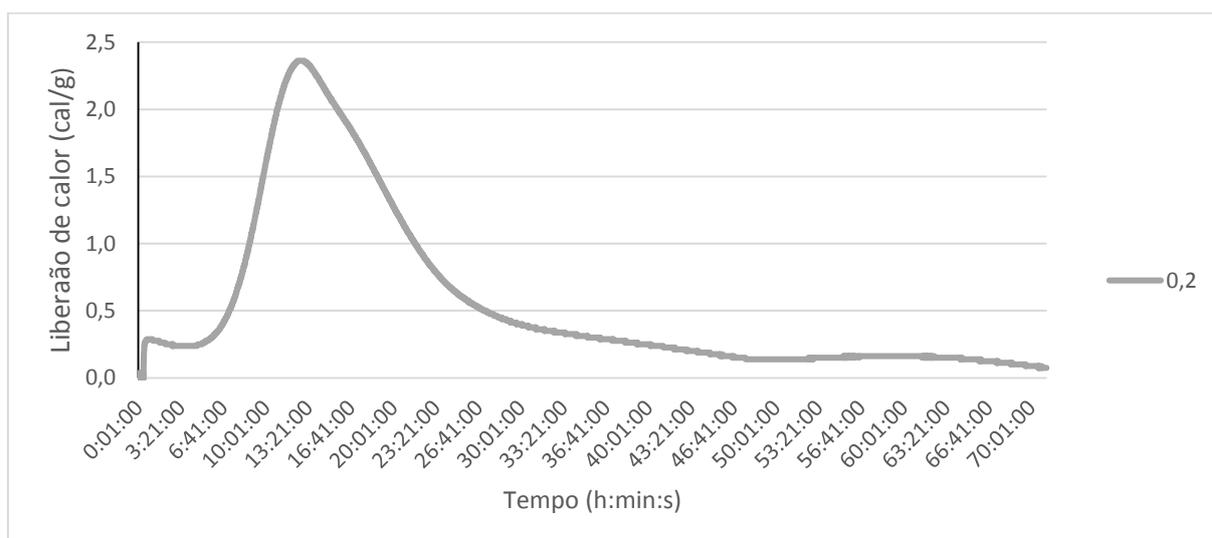


Gráfico 5: Liberação de calor da amostra de 0,6 relação água/cimento.
Fonte: A autora.

No Gráfico 6 está representada a curva da consistência normal do cimento com quantidade de água de 32%; sensor 2 do calorímetro do segundo dia de ensaio. O tempo de início de pega dessa amostra ocorreu por volta da 3 h 45 min, 22,69 °C, com liberação de calor de 0,5 cal/g, no momento de ascensão da curva. O ponto máximo dessa curva acontece às 11 h 15 min com temperatura de 41,25 °C e com liberação de 4,0 cal/g. Ao analisar o tempo de início de pega obtido pelo calorímetro nota-se o quão próximo ficou do encontrado pelo aparelho de Vicat de 3 h 37 min. O tempo de pega de 5 h 34 min obtido pelo Vicat não foi possível identificar no calorímetro, nesse tempo ocorre a liberação de 0,7 cal/g e encontra-se ainda na ascensão da curva.

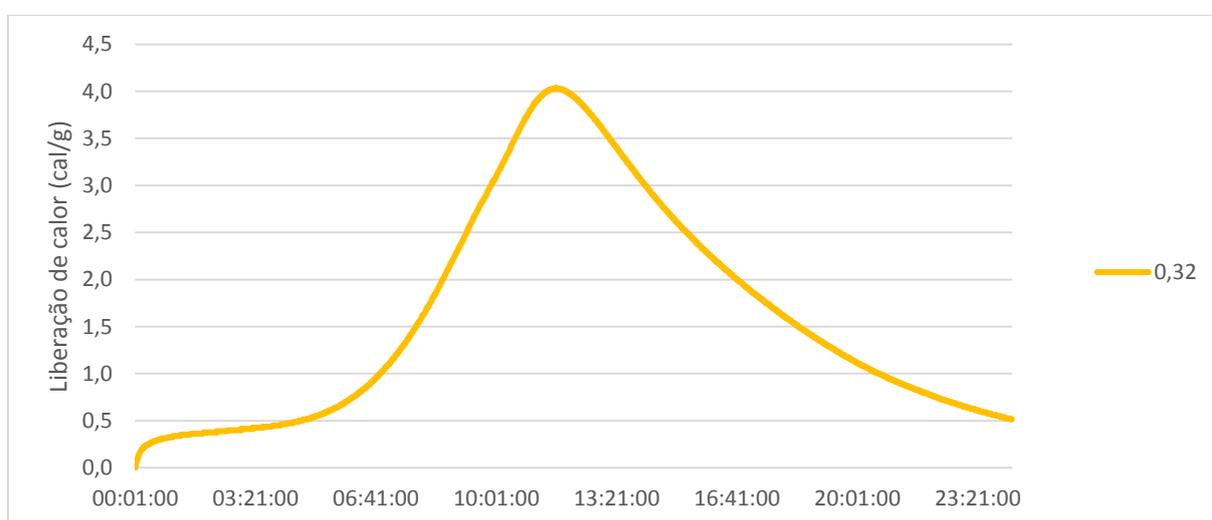


Gráfico 6: Liberação de calor da amostra de 0,32 relação água/cimento.
Fonte: A autora.

A partir dos resultados obtidos ficou verificado a possibilidade da utilização do calorímetro na obtenção do tempo de início de pega dos cimentos, independente de da relação água/cimento.

4.3 RESULTADOS OBTIDOS DA CÂMERA INFRAVERMELHA

No primeiro dia de ensaio a câmera infravermelha filmou apenas a mistura manual do cimento com a água para as três relações água cimento. A mistura de água e cimento com relação de 0,6 permaneceu no primeiro minuto variando muito pouco, alcançando os 20,9 °C nos primeiros segundos, conforme Figura 8. Esses resultados

obtidos com a câmera são estatisticamente iguais já que a precisão da câmera é de ± 2 °C, não sendo adequada para mensurar o calor de hidratação inicial liberado pela reação água e cimento.

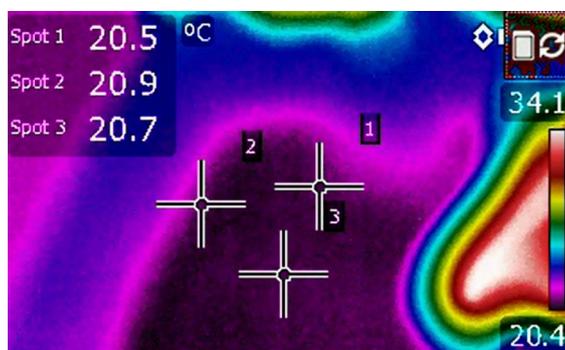


Figura 8: Imagens da câmera infravermelha da mistura de água cimento com relação de 0,6.
Fonte: A autora.

Na Figura 9 observa-se as imagens da mistura com relação de 0,4. Em (a) podemos ver a máxima temperatura alcançada de 22 °C em 3 segundos de mistura e em (b) já com 17 segundos de mistura. A parcela em tom de azul é a água que já entrou em contato com o cimento e passou a liberar calor devido as reações exotérmicas do cimento.

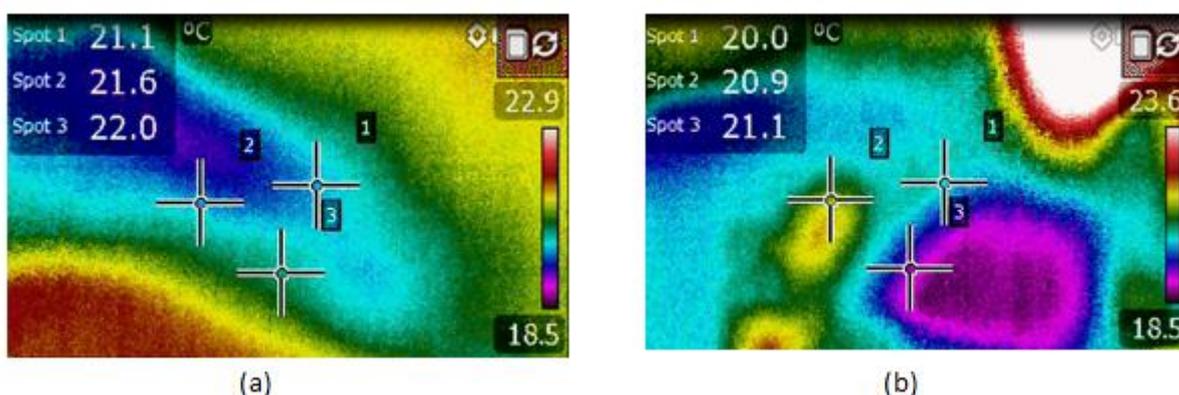


Figura 9: Imagens da câmera infravermelha da mistura de água cimento com relação de 0,4.
Fonte: A autora.

Na Figura 10 está representada as imagens obtidas com a relação de 0,2 em diferentes tempos (a) 2 segundos, (b) 17 segundos, (c) 30 segundos e (d) 54 segundos, o pico máximo fornecido pela câmera foi de 22,5 °C nos primeiros segundo da mistura.

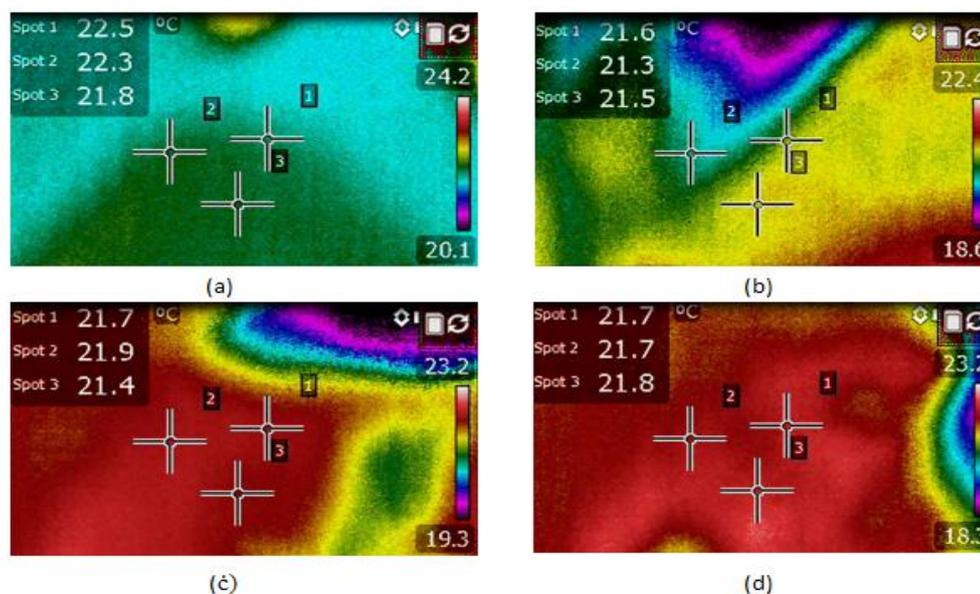


Figura 10: Imagens da câmera infravermelha da mistura de água cimento com relação de 0,2. Fonte: A autora.

Para o segundo dia de ensaio, a câmera infravermelha filmou um período do experimento. No Gráfico 7 estão traçadas as curvas de temperatura observadas pelo calorímetro e pela termografia na consistência normal. É possível observar que o calorímetro obteve temperaturas superiores às obtidas pela termografia, variando em 1,3 à 2,9 °C no período observado. Também foi mais constante a elevação de temperatura decorrido da liberação de calor de hidratação da mistura. As temperaturas lidas pela câmera infravermelha são de superfície, ou seja, as reações que liberaram calor na superfície. Outro fator para serem inferiores é dado pelo sistema aberto em contrapartida o calorímetro é um sistema fechado, isolado do meio externo. Além disso o sensor do calorímetro está inserido na pasta do cimento, obtendo temperaturas da porção central. Esse fenômeno está atrelado fato que a própria massa de cimento impede a saída do calor.

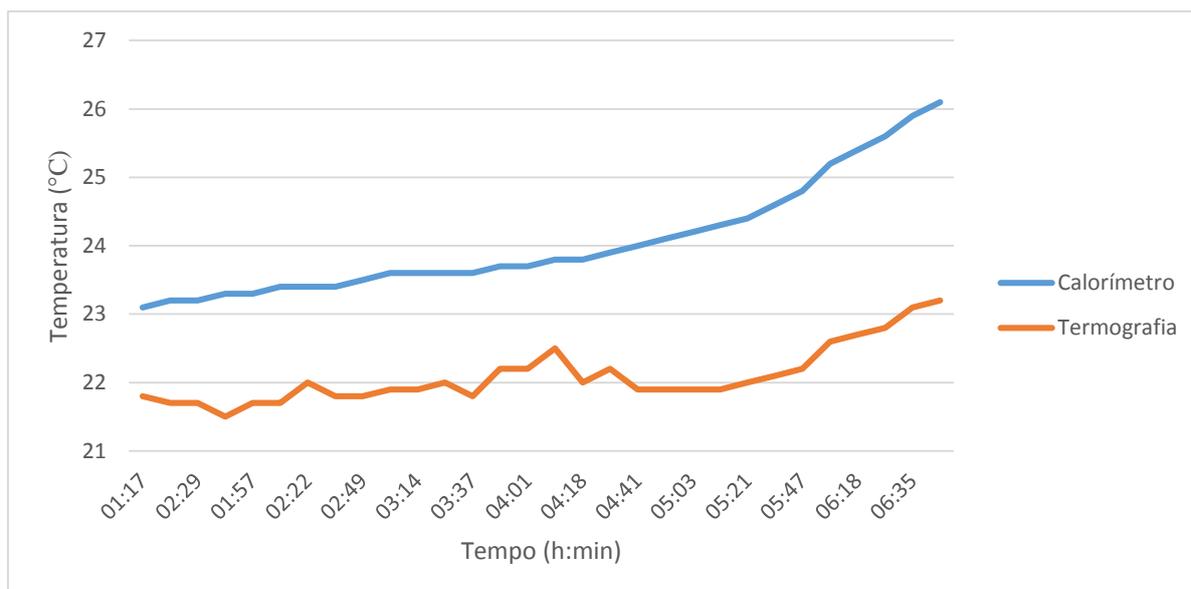


Gráfico 7: Temperatura obtida pelo calorímetro e pela termografia na consistência normal.
Fonte: A autora.

Em uma última análise é perceptível que as curvas do calorímetro e da termografia tem os mesmo desenvolvimento, com leituras diferentes de temperatura, mas captam a variação de calor de hidratação de forma semelhante.

5 CONCLUSÃO

O comportamento do concreto que contém cimento Portland é governado pelas propriedades desse cimento, sendo as características obtidas resultado das reações químicas de hidratação dos compostos do cimento com a água, que são acompanhadas por mudanças na matéria e na energia.

Criou-se um equipamento composto por um calorímetro capaz de determinar do calor de hidratação do cimento. O resultado foi comparado com o obtido pelo aparelho de Vicat e pela termografia. A interpretação das curvas obtidas a partir dessas leituras aferidas permitiram determinar os tempos de pega dos cimentos, sendo o início de pega a ascensão dessa curva e o fim de pega o ponto máximo dessa curva. O conhecimento a respeito dessa informação possibilita programar a logística de produção, transporte e lançamento de concretos com cimento Portland e também de determinar a necessidade da utilização de aditivos a massa.

Os resultados obtidos neste trabalho confirmam a viabilidade do calorímetro para determinação do tempo de início de pega dos cimentos para qualquer quantidade de água e cimento, limitado unicamente pelo volume do recipiente, diminuindo a possibilidade de erro do laboratorista quando comparado a utilização do aparelho de Vicat, pois ficava a cargo daquele aferir o intervalo de leituras e a própria leitura para determinar os tempos de pega dos cimentos. No entanto não foi possível confirmar a efetividade da utilização do calorímetro para determinar o fim de pega, sendo necessário mais ensaios e análises.

Este estudo mostrou também, a inviabilidade da utilização da termografia para esse fim, principalmente devido a sua propriedade de identificar a temperatura apenas na superfície, local de maior troca de calor com o exterior, deixando a massa interna da pasta sem leitura e também a sua precisão de ± 2 °C bastante superior a precisão do sensor do calorímetro de 0,2 °C.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Devido a ampla possibilidade de utilização do calorímetro para determinação dos tempos de pega e a necessidade de concretizar seus resultados, sugere-se os trabalhos futuros sejam direcionados para os seguintes temas:

- Análise equacional que englobe: quantidade de massa de cimento, relação de água/cimento e temperatura, para determinar com mais exatidão o tempo de início e fim de pega dos cimentos;
- Determinação da origem da oscilação da temperatura no sensor responsável por definir a temperatura no interior do calorímetro e a influência do sistema fechado nessa oscilação;
- Utilização de outro métodos para determinar o calor de hidratação e compará-los aos obtidos pelo calorímetro.

REFERÊNCIAS

ABCP – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – **Versatilidade do cimento brasileiro**. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/cms/basico-sobre-cimento/tipos/a-versatilidade-do-cimento-brasileiro>>. Acesso em: 27 de maio 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12819: Concreto e argamassa — Determinação da elevação adiabática da temperatura — Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16606: Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal**. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16607: Cimento Portland – Determinação do tempo de pega, utilizando o aparelho utilizando o aparelho de Vicat**. Rio de Janeiro, 2017.

AZENHA, Miguel; FARIA, Rui; FIGUEIRAS, Helena. **Thermography as a technique for monitoring early age temperatures of hardening concrete** 2011. Elsevier: Construction and Building Materials. Maio 2011. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181100208X>>. Acesso em: 10 de abr. 2017.

BAUER, Luiz A. F. **Materiais de construção**. 5. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC – v.1 - 2000.

FLIR SYSTEMS, **The Ultimate Infrared Handbook for R&D Professionals**, FLIR, 2012.

GE, Zhi. **Predicting temperature and strength development of the field concrete**. 2005. 233 f. Retrospective Theses and Dissertations. Graduate Theses and Dissertations (Doctor of Philosophy) - Civil Engineering Materials. Iowa State University, Ames, 2005.

HALIDDAY, David; RESNICK, Robert. **Fundamentos da física: gravitação, ondas e termodinâmica**. 8. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC – 2009.

KIM, Soo Geun. **Effect of heat generation from cement hydration on mass concrete placement**. 2010. 126 f. Graduate Theses and Dissertations (Master of Science) - Geotechnical Engineering. Iowa State University, Ames, 2010.

ISAIA, Geraldo C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. 1. ed. São Paulo: Editora Geraldo c. Isaia – v. 1 - 2007

ITAMBÉ, Cimentos. **Produtos – Cimento CP IV-32 RS e CP V-ARI**. Disponível em:<<http://www.cimentoitambe.com.br/produtos/>>. Acesso em: 27 de maio 2017.

METHA, P.K.; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concrete, Microstructure, Properties, and Materials**. 3. ed. *McGraw-Hill Company, Inc*, 2006.

MOROPOULOU, Antonia; LABROPOULOS, Kyriakos C.; DELEGOU, Ekaterini T.; KAROGLOU, Maria; BAKOLAS, Asterios. **Non-destructive techniques as a tool for the protection of built cultural heritage**. Elsevier: Construction and Building Materials. Abril 2013. Disponível em:<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061813002547>>. Acesso em: 05 de abr. 2017.

NEVILLE, Adam M. **Propriedades do concreto**. 1. ed. São Paulo: Editora Pini – 1982.

NEVILLE, Adam; Brooks, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Editora Bookman - 2013.

PETRUCCI, Eladio G. R. **Concreto de cimento Portland**. 7. ed. Porto Alegre: Editora Globo – 1980.

SUZANO, Ana B. P.; MATTOS, Monclar S. de C. **Projeto de um sistema de medição de temperatura: análise do calor de hidratação dos cimentos**. 2014. 79 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil), Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2014.

TAKEDA, Othavio. **Investigação de manifestações patológicas em sistemas de revestimentos de fachadas por meio de técnicas de análise termográficas**. 2015. 73f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Departamento Acadêmico de Construção Civil (DACOC), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

TIPLER, Paul A.; MOSCA, Gene. **Física para cientistas e engenheiros**. 6. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC – v. 1 – 2010.

WASHER, Glenn; FENWICK, Richard; NELSON, Seth. **Guidelines for the Thermographic Inspection of Concrete Bridge Components in Shaded Conditions**. Submitted for consideration for publication and presentation at the 92nd Annual Meeting of the Transportation Research Board. University of Missouri. Columbia. 2013.

WEN, Sihai; CHUNG, D.D.L. **Cement-based thermocouples**. Elsevier: Cement and Concrete Research. v.30. p. 507-510, maio 2001.