



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MANUELA PETRA CAVALCANTI DE ANDRADE

DESENVOLVIMENTO DE CALORÍMETRO PARA ESTUDO DAS
VARIAÇÕES DE TEMPERATURA DE CONCRETOS COM
DIFERENTES TIPOS E CONSUMOS DE CIMENTO

RECIFE, 2017

MANUELA PETRA CAVALCANTI DE ANDRADE

**DESENVOLVIMENTO DE CALORÍMETRO PARA ESTUDO DAS VARIAÇÕES DE
TEMPERATURA DE CONCRETOS COM DIFERENTES TIPOS E CONSUMOS DE
CIMENTO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade Federal de Pernambuco para obtenção do
título de Engenheiro Civil.

Área de concentração: Construção civil

Orientador: Prof. M.Eng. Tibério Andrade

RECIFE, 2017

Catálogo na fonte
Bibliotecária: Rosineide Mesquita Gonçalves Luz / CRB-4 / 1361 (BCTG)

A553d Andrade, Manuela Petra Cavalcanti de .
Desenvolvimento de calorímetro para estudos das variações de
temperatura de concretos com diferentes tipos e consumos de cimento /
Manuela Petra Cavalcanti de Andrade – Recife, 2017.

67 folhas, il., fig. tab.

Orientador: Prof. Dr. Tibério Andrade .
TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Departamento de Engenharia Civil, 2017.
Inclui Referências.

1. Engenharia Civil. 2. Calorímetro. 3. Cimento.
4. Concreto. 5. Temperatura. I. Andrade, Tibério (Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2017/269



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
COORDENAÇÃO DO CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ATA DA DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO PARA CONCESSÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL

CANDIDATO(S): 1 – MANUELA PETRA CAVALCANTI DE ANDRADE

2 –

BANCA EXAMINADORA:

Orientador: TIBÉRIO WANDERLEY CORREIA DE ANDRADE

Examinador 1: JOSE JEFERSON DO REGO SILVA

Examinador 2: JOÃO RIBEIRO DE CARVALHO

TÍTULO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO: DESENVOLVIMENTO DE CALORÍMETRO PARA ESTUDO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DO CONCRETO COM DIFERENTES TIPOS E CONSUMOS DE CIMENTO

LOCAL: CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS – BLOCO DE AULAS – SALA 110

DATA: 25/07/2017 **HORÁRIO DE INÍCIO:** 10 HORAS E 00 MINUTOS.

Em sessão pública, após exposição de cerca de 30 minutos, o(s) candidato(s) foi (foram) arguido(s) oralmente pelos membros da banca com NOTA: _____ (deixar 'Exame Final', quando for o caso).

1) () aprovado(s) (nota $\geq 7,0$), pois foi demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema da monografia e o texto do trabalho aceito.

As revisões observadas pela banca examinadora deverão ser corrigidas e verificadas pelo orientador no prazo máximo de 30 dias (o verso da folha da ata poderá ser utilizado para pontuar revisões).

O trabalho com nota no seguinte intervalo, **$3,0 \leq \text{nota} < 7,0$** , será reapresentado, gerando-se uma nota ata; sendo o trabalho aprovado na reapresentação, o aluno será considerado **aprovado com exame final**.

2) () reprovado(s). (nota $< 3,0$)

Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da banca e pelo(s) candidato(s).

Recife, 25 de julho de 2017

Orientador:

Avaliador 1:

Avaliador 2:

Candidato 1:

Candidato 2:

Coordenação do Curso de Engenharia Civil-Dcivil

Rua Acadêmico Hélio Ramos s/nº. Cidade Universitária. Recife-PE CEP: 50740-530.

Fones: (081)2126.8220/8221 Fone/fax: (081)2126.8219.

AGRADECIMENTOS

Ao fim de mais uma etapa, o que resta é agradecer a todas as pessoas que me influenciaram a chegar até aqui. Não importa como, mas de alguma forma me ajudaram a não desistir, aprender com meus erros e comemorar minhas vitórias.

Gostaria de agradecer a minha família, em especial aos meus pais Socorro e Petrus, que me ensinaram desde muito cedo a importância de trilhar caminhos seguros e que a única riqueza que tiramos da vida é o todo o conhecimento acumulado. Também gostaria de agradecer à minha avó Terezinha e ao meu tio Saulo que sempre me proporcionaram os recursos que meus pais não tinham condições, incentivos que foram fundamentais para minha formação.

Agradeço ao meu namorado Bernardo que sempre foi suporte, incentivo e inspiração durante praticamente toda minha vida acadêmica, sempre me ajudando e extrair o meu melhor em tudo que eu faço. Com toda certeza ele foi uma peça fundamental na minha formação.

Agradeço a todos os meus amigos que estiveram ao meu lado, presença essa, que mesmo sem saberem, sempre me trouxe estímulo mais que necessário. Este agradecimento vai em especial para meus amigos que a UFPE me trouxe: Simone, Walmir, Taís, Andressa, Charles, Beltrando e Laís.

Gostaria de agradecer ao meu professor orientador, Tibério, que me ofereceu a oportunidade de trabalhar com um tema tão interessante me dando a liberdade para buscar soluções e me fornecendo todo o apoio que a TECOMAT poderia oferecer. Desta forma, agradeço a Tiago, João, Alexandre e Felipe que sempre foram muito gentis e me ajudaram durante a realização de todos os testes.

Por último, gostaria de agradecer a Daniel que há um ano e meio tem sido um verdadeiro líder sempre se preocupando com meu aprendizado e bem-estar. Quero agradecer, em específico, por toda sua compreensão e confiança durante este período de conclusão do curso.

The books gave Matilda a hopeful and comforting message: You are not alone.

Roald Dahl

RESUMO

Este trabalho apresenta a construção de um calorímetro semiadiabático e seu uso para avaliação do calor proveniente da hidratação de concretos feitos com cimentos disponíveis na Região Metropolitana do Recife. Foram construídos dois calorímetros, servindo o primeiro como teste para definição do calorímetro para este estudo, ambos foram feitos com isopor e poliuretano expandido, materiais estes que tem como principal característica a propriedade de isolantes térmicos. Com o calorímetro definitivo construído, o estudo do calor de hidratação foi conduzido em duas etapas: em sua primeira etapa foi investigada a variação de temperatura do concreto para concretos de mesma dosagem feitos com CPV, CII Z 32 e CIII; na sua segunda, a análise foi repetida para um mesmo tipo de cimento em que se variou o consumo do mesmo. O calorímetro conta com um dispositivo capaz de coletar a temperatura do concreto e do ambiente a cada 120 segundos permitindo as comparações objetivadas neste trabalho. A partir das medições das temperaturas também foi avaliada a eficiência do calorímetro fazendo uso de dados obtidos, na qual foi concluído que o calorímetro desenvolvido ainda necessita de um melhor isolamento.

Palavras chave: Calorímetro. Cimento. Concreto. Temperatura.

ABSTRACT

This work presents the construction of a semiadiabatic calorimeter and its use to evaluate the heat of hydration of concrete made with cements available at the Metropolitan Region of Recife. There were built two calorimeters, the first one was a test to define the final equipment, for both calorimeters were used expanded styrene and expanded polyurethane, materials with thermal isolation as its main characteristics. The study using the calorimeter was conducted in two phases: the first was the investigation of temperature in concretes of same proportioning of materials where just the cement type used was different (CPV, CPII Z 32 and CPIII); in its second phase, the previous analysis was repeated for the same type of cement varying just its consumption. The calorimeter recorded the concrete and environment temperatures separately and allowed the comparisons intended in this work. Using the measurements of the temperatures and confronting the data with references, the efficiency of the calorimeter was also evaluated and it was noticed the need of isolation improvement.

Keywords: Calorimeter. Cement. Concrete. Temperature.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Quadro 1 – Composição dos tipos de cimento comuns e compostos	20
Quadro 2 – Composição dos cimentos de alto-forno e pozolânico	20
Quadro 3 – Fórmula para difusividade térmica	25
Quadro 4 – Tensão gerada pelo encurtamento do concreto devido ao resfriamento	29
Quadro 5 – Temperatura máxima atingida pelo elemento de concreto	30
Figura 1 – Garrafa de Langavant	33
Figura 2 – Equipamento de aferição utilizado	37
Figura 3 – Recipiente (primeiro modelo)	38
Figura 4 e 5 – Primeiro modelo	40
Figura 6 – Termômetro indicando temperatura no lançamento da argamassa	41
Figura 7 e 8 – Segundo modelo	43
Figura 9 – Esquema e dimensões do calorímetro (segundo modelo)	44
Figura 10 – Teste de abatimento, primeira série, CPV	46
Figura 11 – Registro da temperatura de lançamento, primeira série, CPV	47
Figura 12 e 13 – Início do registro	47
Figura 14 – Teste de abatimento, primeira série, CPII-Z-32	49
Figura 15 – Temperatura de lançamento, primeira série, CPII-Z-32	50
Figura 16 e 17 – Início do registro	50
Figura 18 – Teste de abatimento, primeira série, CPIII	52
Figura 19 – Temperatura de lançamento, primeira série, CPIII	52
Figura 20 e 21 – Início do registro	53
Figura 22 e 23 – Abatimento para concreto de consumo de 300 kg/m ³	54
Figura 24 – Temperatura de lançamento para concreto de consumo de 300 kg/m ³	55
Figura 25 – Abatimento para concreto de consumo de 500 kg/m ³	56

Figura 26 – Temperatura inicial para concreto de consumo de 500 kg/m ³	56
Figura 27 – Evolução unitária de temperatura para diferentes concretos	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Condutividade térmica de diferentes materiais	36
Tabela 2 – Traço e argamassa	40
Tabela 3 – Traço unitário, primeira série, CPV	45
Tabela 4 – Demais parâmetros do concreto, primeira série, CPV	46
Tabela 5 – Traço unitário, primeira série, CPII-Z-32	48
Tabela 6 – Demais parâmetros do concreto, primeira série, CPII-Z-32	49
Tabela 7 – Traço unitário, primeira série, CPIII	51
Tabela 8 – Demais parâmetros do concreto, primeira série, CPIII	51
Tabela 9 – Resumo dos resultados primeira série	58
Tabela 10 – Resumo dos resultados segunda série	60
Tabela 11 – Coeficiente de elevação adiabática para diferentes cimentos	63
Tabela 12 – Coeficiente de elevação adiabática para diferentes consumos	63
Tabela 13 – Temperaturas teóricas e obtidas	65

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Variação de temperatura versus tempo para argamassa	42
Gráfico 2 – Temperatura versus tempo, primeira série, CPV	48
Gráfico 3 – Temperatura versus tempo, primeira série, CP-II-Z-32	51
Gráfico 4 – Temperatura versus tempo, primeira série, CP-III	53
Gráfico 5 – Temperatura versus tempo, segunda série, CP-II-Z-32 (300 kg/m ³)	55
Gráfico 6 – Temperatura versus tempo, segunda série, CP-II-Z-32 (500 kg/m ³)	57
Gráfico 7 – Resumo das temperaturas primeira série	59
Gráfico 8 – Resumo dos tempos primeira série	59
Gráfico 9 – Comparação da variação das temperaturas	60
Gráfico 10 – Resumo das temperaturas segunda série	61
Gráfico 11 – Resumo dos tempos segunda série	61
Gráfico 12 – Comparação da variação das temperaturas	62

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Justificativa e motivação	15
1.2	Objetivos gerais e específicos	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	Cimento Portland	18
2.1.1	Composição do cimento Portland	19
2.1.2	Tipos de cimento Portland	19
2.1.2.1	<i>Cimentos Portland comuns e compostos</i>	19
2.1.2.2	<i>Cimentos Portland de alto-forno e pozolânico</i>	20
2.1.2.3	<i>Cimento Portland de alta resistência inicial</i>	21
2.1.2.4	<i>Cimentos Portland Resistentes aos Sulfatos</i>	21
2.1.2.5	<i>Cimento Portland de baixo calor de hidratação</i>	22
2.1.2.6	<i>Cimento Portland branco</i>	22
2.2	Calor de hidratação	22
2.2.1	Fatores de influência no comportamento térmico do concreto	23
2.2.1.1	<i>Temperatura ambiente e temperatura de lançamento do concreto</i>	24
2.2.1.2	<i>Propriedades térmicas do concreto</i>	24
2.2.1.3	<i>Dimensões e volume da peça concretada</i>	25
2.2.1.4	<i>Cura e proteção superficial do concreto</i>	25
2.2.1.5	<i>Processo de concretagem</i>	26
2.2.1.6	<i>Consumo de cimento</i>	26
2.2.1.7	<i>Relação água/cimento</i>	27
2.2.1.8	<i>Tipo de cimento</i>	27
2.3	Influências do calor de hidratação nas propriedades do concreto	28
2.4	Determinação normatizada do calor de hidratação	32

2.4.1	NBR 8809 Cimento Portland - Determinação do calor de hidratação a partir do calor de dissolução - Método de ensaio	32
2.4.2	NBR 12006 Cimento – Determinação do calor de hidratação pelo método da garrafa de Langavant	33
2.5	Funcionamento de um calorímetro	34
2.5.1	Calorímetro isotérmico	34
2.5.2	Calorímetro isoperibol	34
2.5.3	Calorímetro de varrimento de temperatura	35
2.5.4	Calorímetro adiabático	35
3	RELATÓRIO TÉCNICO DE CONSTRUÇÃO DO CALORÍMETRO	36
3.1	Escolha dos materiais de composição	36
3.2	Equipamento de aferição	37
3.3	Primeiro modelo	38
3.3.1	Construção do primeiro modelo	39
3.3.2	Primeiro modelo finalizado	39
3.3.3	Teste do primeiro modelo	40
3.4	Segundo modelo	42
3.4.1	Construção do segundo modelo	43
3.4.2	Resultado	43
4	REALIZAÇÃO DOS TESTES	45
4.1	Primeira série de testes – avaliação para diferentes tipos de cimento	45
4.1.1	Teste do CPV	45
4.1.2	Teste do CII-32	48
4.1.3	Teste do CIII	51
4.2	Segunda série de testes – avaliação para diferentes consumos de um mesmo cimento	54
4.2.1	CII-Z-32 com consumo de 300 kg/m ³	54
4.2.2	CII-Z-32 com consumo de 500 kg/m ³	56

5	ANÁLISE DE RESULTADOS	58
5.1	Máxima temperatura para os diferentes cimentos	58
5.2	Máxima temperatura para os diferentes consumos do cimento	60
6	ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO CALORÍMETRO	63
7	CONCLUSÃO	66
	REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento constante da tecnologia na construção civil, é cada vez maior o nível de qualidade exigido aos engenheiros, sendo assim necessário um estudo mais profundo e detalhado das propriedades físicas e químicas dos diversos materiais de construção disponíveis ao homem, visando sempre aperfeiçoar suas propriedades e reduzir os custos.

Pedra artificial constituída de agregados envolvidos por uma matriz cimentícia denominada de cimento Portland, sendo este empregado em inúmeros produtos e aplicações dentro da construção civil, o concreto é o material estrutural mais usado no planeta. Segundo Mehta e Monteiro (2013), em volume, o produto mais produzido atualmente no mundo é o concreto. Esse uso em grande escala é consequência das suas características estruturais, econômicas, variedade de formatos e resistência à água.

O concreto pode apresentar diferentes comportamentos e características de acordo com sua dosagem, materiais componentes e finalidade de uso. Por este motivo, o concreto é um dos temas mais abordados e estudados pelos engenheiros que buscam determinar e controlar os diferentes fatores de influência no seu desempenho.

Diferente do aço que possui um processo de fabricação bastante controlado e, conseqüentemente, um comportamento estrutural mais previsível fruto da sua homogeneidade, o desempenho do concreto é dependente dos seus materiais, do seu processo de lançamento, das características do ambiente e outros inúmeros fatores.

Desta forma, é notória a necessidade de um controle tecnológico cada vez mais efetivo do concreto e dos seus materiais constituintes. Segundo Mehta e Monteiro (2013), um dos fatores destacáveis na influência do desempenho do concreto é a ocorrência de elevadas temperaturas, cujos efeitos e origem serão analisados mais detalhadamente neste trabalho.

1.1 Justificativa e motivação

É estimado que o consumo atual do concreto no mundo é na ordem de 33 bilhões de toneladas métricas todo ano (MEHTA e MONTEIRO, 2013). Apenas no Brasil, segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2013), a produção de concretos em centrais aumentou em 180% entre os anos de 2005 e 2012, estimando-se que as concreteiras brasileiras tenham produzido 51 milhões de metros cúbicos em 2012, estes são dados de uma pesquisa

realizada pela e8 inteligência UBM Brazil em parceria com a ABCP. Esses números são reflexos do desenvolvimento e urbanização das grandes cidades que resultam em construções de múltiplos pavimentos cada vez maiores.

A execução de construções de grande porte tem exigido concretagens com volumes cada vez maiores principalmente pilares e elementos de fundações empregando concretos de resistências mais elevadas. Desde prédios comerciais e residenciais nos grandes centros urbanos até a construção de imensas usinas hidrelétricas, a concretagem de peças de grandes volumes e de resistências mais elevadas é um fato que deixou de ser algo excepcional e passou a ser rotina nos projetos de engenharia. São nesses casos em que os cuidados com o calor de hidratação devem ser ainda maiores, pois o calor liberado é acumulado, o que leva ao aquecimento desses elementos podendo as temperaturas ultrapassarem facilmente 80°C, 85°C.

O excessivo calor gerado pela hidratação do cimento pode causar dois problemas que afetam diretamente no desempenho e na durabilidade do mesmo: a fissuração da peça concretada e a formação de etringita tardia (em inglês, DEF, *delayed ettringite formation*) (SACHS 2012).

Sendo as dimensões da peça e a resistência do concreto características que não se podem alterar com facilidade, é de grande importância o estudo dos demais fatores de influência no calor de hidratação liberado pelo concreto. Um destes fatores é o cimento utilizado no concreto, já que o calor liberado é consequência da reação exotérmica de hidratação do cimento.

Desta forma, é fácil observar a importância do estudo das propriedades térmicas do concreto, já que estas afetam diretamente sua durabilidade e seu desempenho. Um dos principais fatores de influência nestas propriedades é a escolha do cimento que pode contribuir para um maior ou um menor calor liberado. Comparar e ter informações sobre este insumo é um grande diferencial no estudo das propriedades térmicas do concreto.

Visando realizar este estudo, foi construído um calorímetro semiadiabático capaz de registrar o calor liberado pelo concreto e armazenar estes dados para uma análise posterior.

1.2 Objetivos gerais e específicos

O objetivo desse trabalho é a construção de um calorímetro com materiais isolantes de fácil acesso, tendo este equipamento um volume suficiente para ensaios com concreto. Com a construção do calorímetro, será apresentado um relatório técnico de todo o procedimento de

construção deste equipamento e dos testes realizados com o mesmo. Este calorímetro semiadiabático, simples, reutilizável e portátil é composto de material acessível disponibilizado na Região Metropolitana do Recife. Todos estes materiais foram previamente estudados com o objetivo de garantir o funcionamento satisfatório do equipamento.

Fazendo uso deste equipamento, foi investigada a influência do consumo e do tipo de cimento no calor liberado pela reação exotérmica de hidratação do mesmo. Esta investigação tem a finalidade de classificar os tipos de cimento em termos da quantidade de calor liberado com sua hidratação.

Esta classificação é importante para a determinação dos cimentos mais adequados para concretagens onde o cuidado com o calor liberado pelo concreto é um fator crítico na qualidade da peça concretada.

Além disso, esse estudo utilizando cimentos e dosagens distintas dará informações para a avaliação da eficiência do calorímetro e se, com esse equipamento, será possível simular a evolução das temperaturas de concretos aplicados em peças massivas empregando diferentes ações para controle. Essas ações poderiam ser: mudança do cimento, diferentes dosagens com consumos de cimento e aditivos distintos ou refrigeração do concreto com emprego de gelo.

Caso a eficiência não seja satisfatória, os dados obtidos servirão para o aprimoramento do equipamento em estudos futuros.

Para se alcançar o objetivo geral, é indispensável a realização de algumas atividades:

- Investigar os melhores materiais para construção do calorímetro de acordo com suas propriedades de isolamento;
- Escolher os cimentos para estudo calorimétrico entre os cimentos disponíveis na Região Metropolitana do Recife;
- Comparação das temperaturas para os cimentos estudados; e
- Comparação das temperaturas para diferentes consumos de cimento.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesse tópico são resumidas as características de interesse dos tipos de cimento de Portland, das propriedades relacionadas com o calor de hidratação e dos testes de interesse para determinação do mesmo.

2.1 Cimento Portland

Como um dos grandes objetivos deste trabalho é investigar como o tipo e o consumo do cimento usado influencia nas temperaturas atingidas pelo concreto, é indispensável um estudo prévio dos diversos tipos de cimentos disponíveis no mercado brasileiro. É impossível estudar o comportamento térmico do concreto sem ter um domínio extenso do conhecimento sobre o cimento. Conhecer a composição do cimento e o que diferencia cada um de seus tipos é o primeiro passo para entender o porquê da sua grande influência nas características gerais do concreto.

O cimento Portland é a denominação para este material conhecido simplesmente como cimento. Este foi inventado em 1824 na Inglaterra pelo químico Joseph Aspdin e, quando criado, teve sua dureza e coloração comparada à pedra de Portland, uma pedra encontrada na ilha de Portland localizada ao sul da Inglaterra. O cimento Portland é o material de construção de mais extenso uso no mundo (BATTAGIN, 2002).

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland, a história do cimento brasileiro teve início em 1888 quando o comendador Antônio Proost Rodovalho se empenhou em instalar uma fábrica na fazenda Santo Antônio, de sua propriedade, situada em Sorocabano, estado de São Paulo.

Desde esta época até os dias atuais, a indústria do cimento brasileiro veio se desenvolvendo. Segundo o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (Cimento.org, 2016), apenas em 2016 foram produzidas mais de 48 milhões de toneladas de cimento, sendo este um valor pequeno quando comparado com as 71 milhões de toneladas produzidas em 2014.

Os estudos frequentes do cimento na construção civil resultaram, entre outros avanços, no desenvolvimento de diferentes tipos de cimento que se moldam às necessidades do homem.

2.1.1 Composição do cimento Portland

O cimento Portland é composto por clínquer e adições. O clínquer é a principal matéria prima e é comum a todo e qualquer tipo de cimento. O fator variável das diversas composições de cimento são as adições, estas que irão diferenciar um tipo de cimento do outro.

Por sua vez, o clínquer é composto por calcário e argila. Na sua produção a rocha calcária é britada, moída e misturada com a argila em um forno com temperaturas de aproximadamente 1450 °C. O resultado dessa mistura é clínquer que é, posteriormente, moído e transformado em pó. A principal característica do clínquer é a sua reatividade na presença da água que o transforma em uma pasta que, quando endurecida, adquire resistência e durabilidade elevadas. É o clínquer que fornece ao cimento a sua característica de aglomerante hidráulico, fator que caracteriza a reatividade do material na presença da água.

Como exposto anteriormente, as adições e seus percentuais no cimento são os fatores que diferenciam cada tipo de cimento do mercado. Essas adições, segundo a normalização brasileira, podem ser a escória de alto forno, pozolana e filler calcário. A gipsita, apesar de poder ser considerada uma adição, esta está sempre presente no cimento tendo como objetivo regular a pega do cimento Portland.

2.1.2 Tipos de cimento Portland

Este estudo é baseado nos principais tipos de cimentos disponíveis no mercado brasileiro regidos por normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas.

2.1.2.1 Cimentos Portland comuns e compostos

O cimento Portland comum, cuja a normalização brasileira especifica o CPI e o CP I-S. O CP I, é o cimento clássico constituído apenas de clínquer e gesso. O CP I-S pode ter uma pequena adição de 1% a 5% escória, pozolana ou filler calcário. Em consequência das necessidades econômicas, ambientais e das diferentes aplicações do concreto, foi surgindo a necessidade do desenvolvimento de outros tipos de cimento, desta forma, os cimentos Portland comuns não são mais encontrados no mercado brasileiro.

Os cimentos Portland compostos são os cimentos que apresentam adições além do gesso, porém em quantidades inferiores aos dos cimentos com adições, que serão discutidos

posteriormente. Os tipos de cimentos compostos são CP II-E, CP II-Z, CP II-F, os quais recebem adição de escória de alto-forno, pozolana e material carbonático (fíller), respectivamente. Atualmente os cimentos Portland compostos são os mais encontrados no mercado, respondendo por aproximadamente 75% da produção industrial brasileira; são utilizados na maioria das aplicações usuais em substituição ao antigo CP I (ABCP, 2002). O Quadro 1 resume a composição desses tipos de cimento.

Quadro 1 – Composição dos tipos de cimento comuns e compostos

Tipo de cimento portland	Sigla	Composição (% em massa)				Norma Brasileira
		Clínquer + gesso	Escória granulada de alto-forno (sigla E)	Material pozolânico (sigla Z)	Material carbonático (sigla F)	
Comum	CP I	100	-			NBR 5732
	CP I-S	99-95	1-5			
Composto	CP II-E	94-56	6-34	-	0-10	NBR 11578
	CP II-Z	94-76	-	6-14	0-10	
	CP II-F	94-90	-	-	6-10	

Fonte: adaptado de Guia Básico de Utilização do Cimento Portland, 2002

2.1.2.2 Cimentos Portland de alto-forno e pozolânico

Estes tipos de cimento foram criados na busca da diminuição do consumo de energia na fabricação do cimento. Com isso, foram adicionados de forma mais significativa a escória de alto-forno e o material pozolânico, dando origem aos CP III e CP IV, respectivamente. A adição desses materiais resulta na diminuição do uso do clínquer e, conseqüentemente, altera o comportamento do cimento. O Quadro 2 expõe a composição destes dois tipos de cimento.

Quadro 2 – Composição dos cimentos de alto-forno e pozolânico

Tipo de cimento portland	Sigla	Composição (% em massa)				Norma Brasileira
		Clinker + gesso	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático	
Alto-Forno	CP III	65-25	35-70	-	0-5	NBR 5735
Pozolânico	CP IV	85-45	-	15-50	0-5	NBR 5736

Fonte: adaptado de Guia Básico de Utilização do Cimento Portland, 2002

A adição destes dois materiais traz como consequência alterações da microestrutura do concreto o que diminui os poros e a permeabilidade promovendo uma maior estabilidade química a pasta de cimento endurecida em meio sulfatado. Além desses fatores, as adições têm poder de mitigar a reação álcali agregado, sendo, portanto, cimentos que tendem a aumentar a durabilidade do concreto em meios agressivos. Outras características que são alteradas com o emprego dessas adições é o desenvolvimento de resistências iniciais mais lentas, entretanto, possuem ganhos de resistência maiores a idades mais avançadas em relação aos cimentos sem ou com pouca adição. Além disso, são cimentos que, de um modo geral, liberam menor calor de hidratação.

2.1.2.3 Cimento Portland de alta resistência inicial

São os cimentos utilizados quando se é necessário o desenvolvimento acelerado das resistências iniciais do concreto. Esta característica é alcançada a partir de uma dosagem diferente de calcário e argila durante a produção do clínquer, para a produção de uma maior quantidade de C_3S , e uma maior moagem tornando as partículas de cimento mais finas. A consequência das partículas mais finas do cimento é uma rápida hidratação com o alcance de resistência inicial em um período de tempo menor (maior superfície específica, maior a superfície de hidratação, mais rápida a reação). Esses cimentos podem ter de 100% a 95% de clínquer mais gesso e de 0% a 5% de *filler* calcário.

2.1.2.4 Cimentos Portland Resistentes aos Sulfatos

Estes são os cimentos que desenvolvem uma resistência aos ataques de sulfato. Estes cimentos são usados para concretos que serão utilizados em ambientes agressivos como redes de esgoto por exemplo. Segundo a NBR 5737 (ABNT, 1992), são considerados resistentes a sulfatos:

- os cimentos cujo o teor de C_3A do clínquer igual ou inferior a 8% e cujo teor de adições carbonáticas seja igual ou inferior a 5% em massa do aglomerante total e/ou;
- os cimentos Portland de alto-forno (CP III) cujo teor de escória granulada de alto-forno esteja entre 60% e 70% e/ou;

- cimentos Portland pozolânicos (CP IV) cujo teor de materiais pozolânicos esteja entre 25% e 40%; e/ou
- cimentos que tiverem antecedentes com base em resultados de ensaios de longa duração ou referências de obras que comprovadamente indiquem resistência aos sulfatos.

Desta forma, qualquer um dos cimentos citados anteriormente, com exceção do CPIIF, que apresente uma ou mais características listadas acima, é classificado como um cimento resistente aos sulfatos e poderá ser adicionada a sigla RS no final de sua denominação (Ex: CPII Z 40 RS).

2.1.2.5 Cimento Portland de baixo calor de hidratação

Segundo a NBR 13116 (ABNT, 1994), os cimentos de baixo calor de hidratação são aqueles que, durante o processo de hidratação geram até 260 J/g e até 300 J/g aos 3 e aos 7 dias de idade respectivamente. Se um cimento se enquadrar nesse requisito, o fabricante poderá informar colando a sigla BC no final da denominação do cimento (Ex: CP II 32 BC).

2.1.2.6 Cimento Portland branco

Como o próprio nome já diz, este é o cimento que possui a coloração branca. Este tipo de cimento pode ser subdividido em cimento branco estrutural e cimento branco não estrutural. A cor deste cimento é resultado da sua composição que utiliza materiais com baixos teores de óxidos de ferro e manganês. O cimento branco é bastante usado para fins arquitetônicos, onde a aparência da peça concretada tem grande importância.

2.2 Calor de hidratação

O cimento Portland é definido como um aglomerante hidráulico. Esta definição é consequência da sua capacidade de reagir com a água, a partir do processo de hidratação, resultando em um material endurecido e resistente à própria água.

O cimento Portland é composto por elementos químicos em estado de grande energia e desequilíbrio. Quando hidratados, os grãos de cimento reagem com a água e liberam energia

em forma de calor, sendo esta energia nomeada de calor de hidratação. Em outras palavras, calor de hidratação é a energia liberada pela reação exotérmica de hidratação do cimento.

O calor de hidratação é algo inerente ao concreto e pode ter consequências negativas ou positivas, como é o exemplo de concretagens em locais com temperaturas muito baixas onde o acréscimo na temperatura facilita a concretagem evitando o congelamento da água.

Sendo um estudo conduzido no Brasil para concretos feitos de materiais disponíveis na cidade de Recife, o efeito de grande elevação de temperatura será principalmente prejudicial para a durabilidade do concreto. Desta forma, cabe aos engenheiros analisar como a elevação da temperatura afetará o desempenho do concreto e quais medidas devem ser tomadas durante a concretagem para se evitar que sejam atingidas temperaturas capazes de gerar problemas indesejáveis.

2.2.1 Fatores de influência no comportamento térmico do concreto

O problema térmico no concreto pode ser interpretado da seguinte forma: o concreto gera calor nas reações de hidratação, sendo essa liberação mais intensa nas primeiras 24, 48 horas. Esse calor, à medida que é liberado, é dissipado pelas suas faces e, ao fim de certo tempo, dependendo de vários fatores, atinge a temperatura de equilíbrio (ACI 207.1R, 1996).

A temperatura máxima atingida pelo concreto é resultado da temperatura de lançamento, sendo esta dependente da temperatura individual dos seus componentes, da temperatura do meio externo, da elevação da temperatura interna devido ao calor liberado pela a hidratação do cimento, da sua capacidade de transferir calor e da dimensão e geometria da peça.

Pode-se afirmar que em peças massivas de concreto, o regime de aquecimento do núcleo do elemento é muito próximo do regime adiabático, isto é, não existe ou existe muito pouca troca de calor com meio. Isso é função da taxa de liberação muito alta e lenta dissipação do calor em função da elevada dimensão do elemento e baixa difusão do calor pelo concreto.

Como exposto anteriormente, o processo de hidratação do cimento é uma reação exotérmica e independente das ações tomadas ela irá ocorrer e elevará a temperatura do concreto. Este comportamento é algo inevitável, porém é possível estudar e analisar alguns fatores que têm grande influência no comportamento térmico do concreto, para que assim se controle a temperatura máxima a ser atingida pelo concreto, minimizando a ocorrência de fissuração térmica e ou formação de etringita tardia.

2.2.1.1 Temperatura ambiente e temperatura de lançamento do concreto

Com já foi citado, a temperatura atingida pelo concreto é uma soma da temperatura durante seu lançamento ainda fresco, com o incremento de temperatura resultante da reação de hidratação do cimento e com a temperatura absorvida ou liberada para o meio externo. Desta forma, fica claro que controlar a temperatura de lançamento do concreto é um fator importante no projeto.

Uma forma de controlar a temperatura de lançamento do concreto é monitorando a temperatura de seus componentes durante a mistura, como por exemplo os agregados, o cimento e a água. Resfriar os agregados ou armazenar os mesmos em um ambiente com temperatura controlada são procedimentos aconselhados para evitar temperaturas muito elevadas. Uma alternativa aconselhada para a água é usá-la na forma de gelo, sendo esta uma solução bastante satisfatória.

2.2.1.2 Propriedades térmicas do concreto

São três as propriedades térmicas do concreto: condutividade térmica, calor específico e difusividade térmica.

Estes fatores irão determinar a facilidade ou a dificuldade que o concreto terá para conduzir calor, confinar o calor e como este calor irá variar a sua temperatura.

Condutividade térmica é definida como a velocidade do fluxo de calor através de uma espessura unitária, sobre uma área unitária, dos materiais submetidos a uma diferença de temperatura unitária entre as duas faces paralelas (FURNAS, 1997), isso é, é a habilidade de um material conduzir calor.

Segundo A. M. Neville (2013), a condutividade do concreto depende de sua composição e, quando saturados, a condutividade apresenta valores na faixa entre 1,4 J/m.s.K e 3,6 J/m.s.K. Já para Mehta e Monteiro (2013), a condutividade térmica do concreto é influenciada pelas características mineralógicas do agregado, pelo teor de umidade, densidade e temperatura do concreto; estes fatores combinados irão definir se o concreto transferirá calor para o meio com mais ou menos facilidade.

Com os valores acima demonstrados, é possível perceber que, apesar de não ser um material isolante, o concreto apresenta uma certa resistência para transferir calor, o que faz com

que o calor gerado durante o processo de hidratação não seja liberado para o meio externo com grande facilidade, favorecendo, assim, o seu aumento de temperatura interna.

Calor específico é definido como a quantidade de calor necessária para variar a temperatura em uma unidade de um corpo de massa unitária. Para concretos de densidade normal, este fator não varia muito em consequência do tipo de agregado, temperatura e outros fatores. Tipicamente os valores do calor específico do concreto estão em um intervalo de 0,9 para 1,0 kJ/kg.°C (MEHTA e MONTEIRO 2013).

Difusividade térmica (δ) é a relação entre a condutividade térmica do concreto (K), o calor específico (c) e a densidade do concreto (ρ), com demonstrado abaixo (Quadro 3):

Quadro 3 – Fórmula para difusividade térmica

$$\delta = \frac{K}{c \cdot \rho}$$

Fonte: Neville (2013)

Quanto maior a difusividade térmica, mais fácil é para o calor atravessar o concreto e mais difícil é seu confinamento. Para concretos com densidade normal, a condutividade térmica é o fator determinante da difusividade térmica, já que não são muito variáveis os valores para a densidade e calor específico.

2.2.1.3 Dimensões e volume da peça concretada

O grande problema envolvendo as dimensões da peça concretada e o calor é a dificuldade que este terá de se dissipar para o meio externo. Desta forma, não é apenas o volume que importa, mas sim a distância que a energia percorrerá do centro da peça até suas faces. É fácil perceber que, mesmo tendo o mesmo volume de concreto, o calor seria dissipado com maior facilidade em uma laje do que em um bloco cúbico de concreto. Pode-se admitir que peças de concreto cuja a menor dimensão seja superior a 0,70m, já possui massividade para acumular calor.

2.2.1.4 Cura e proteção superficial do concreto

A cura do concreto é o processo adotado para evitar a evaporação da água antes da hidratação completa do cimento, evitando o aparecimento de fissuras na superfície da peça concretada.

Protegendo bem a superfície e mantendo-a úmida é uma das formas de realizar a cura. Este processo evita a absorção de calor externo e reduz a temperatura superficial da peça e, de uma forma geral, evita o aumento excessivo do calor interno do concreto.

Por mais que seja prevista em projeto a quantidade de calor gerada pela hidratação do cimento, a temperatura interna do concreto pode ser superior ao imaginado, caso não sejam tomados os cuidados com a cura e exposição da peça ao sol trazendo efeitos negativos não esperados.

Entretanto, essa ação sozinha não chega a ser efetiva para reduzir o pico, já que o calor gerado é produzido internamente e utilização de cura eficiente não vai aumentar a taxa de dissipação de tal ordem que venha a suprimir a necessidade da adoção de outras ações.

2.2.1.5 Processo de concretagem

O processo de concretagem é um fator de grande importância durante o estudo e a definição do processo construtivo. A escolha de um procedimento econômico, eficiente e de fácil realização é o que todos engenheiros almejam.

Analisando pela ótica térmica, é importante definir o processo de concretagem de forma a tornar mais fácil a dissipação do calor para o meio externo. Uma maneira de alcançar este objetivo é a partir da divisão da concretagem em lançamentos sucessivos de camadas de concreto. Estas camadas devem ter espessuras predeterminadas e os lançamentos devem ser realizados em intervalos de tempo definidos de forma a evitar problemas térmicos causados pelo confinamento do calor no centro das peças concretadas, isto é, de forma a facilitar a dissipação do calor.

2.2.1.6 Consumo de cimento

Como já explicado anteriormente, o calor de hidratação é resultado da reação exotérmica de hidratação do cimento. Desta forma, é fácil perceber que quanto maior o consumo do cimento, maior a quantidade da fonte geradora de calor e, então, maior será o calor confinado no concreto e, conseqüentemente, o aumento da sua temperatura.

É fácil perceber que a definição do traço do concreto é um ponto de grande importância para o projeto, já que este definirá as características estruturais do mesmo. Entretanto,

analisando termicamente o concreto, a definição do consumo de cimento ganha uma importância especial quando se é necessário controlar sua temperatura. Desta forma, para peças massivas, deve se estudar a dosagem com o intuito de reduzir ao máximo o consumo de cimento, desde que este atenda à resistência característica à compressão do concreto e as especificações de durabilidade.

2.2.1.7 Relação água/cimento

Quando mantido o mesmo consumo de cimento para concretos com diferentes relações água/cimento (a/c), o calor de hidratação liberado será maior quanto maior for o a/c. Quando se é disponibilizada uma maior quantidade de água, se facilita o processo de hidratação, levando a uma maior taxa de hidratação e liberação de calor. O aumento no calor de hidratação em 7 (sete) dias resultante do aumento do a/c de 0,4 para 0,6 é de aproximadamente 11% para cimentos americanos Tipo I (CONCRETE TECHNOLOGY TODAY, 1997).

A relação água/cimento tem um poder de influência no calor de hidratação menor que o consumo de cimento. Em geral, concretos com menores a/c apresentam um maior consumo de cimento. Como já foi demonstrado no item 2.1.1.6, um consumo de cimento elevado traz como consequência um maior calor hidratação.

2.2.1.8 Tipo de cimento

Como já explicado, o cimento é o maior responsável pelo calor resultante do concreto, desta forma, é clara que a escolha do tipo de cimento é um ponto de muita importância quando se é necessário controlar o calor.

Existem diversos tipos de cimento no mercado brasileiro e mundial, cada um deles composto por diferentes materiais ou diferentes proporções de materiais. Estas variações de composição resultam em comportamentos distintos de cimento para cimento. A escolha do tipo de cimento a ser usado é definida de acordo com características desejadas para o concreto, com disponibilidade local e fatores econômicos.

Não é diferente para o calor de hidratação: quando a temperatura do concreto é um fator de importância, é indispensável o cuidado com a definição do tipo do cimento.

O objetivo deste trabalho é classificar os cimentos de acordo com a quantidade de calor liberada, testando diferentes concretos variando apenas o cimento e o consumo. O estudo detalhado é tratado no item 4 desse trabalho.

2.3 Influências do calor de hidratação nas propriedades do concreto

Submeter o concreto fresco a temperaturas muito elevadas traz como consequência alterações no comportamento deste quando endurecido. Podem ser destacadas duas destas consequências: o surgimento de fissuras e a formação de etringita tardia (DEF), ambas negativas e que devem ser evitadas.

Após a concretagem e hidratação do cimento, a peça passa pelo processo de resfriamento, porém este não ocorrerá homogeneamente por toda a peça. Existe uma diferença entre a sua temperatura interna e a externa que pode ser representada pelo gradiente térmico. Segundo Carlson (1937), gradiente térmico é a diferença de leitura de temperatura entre dois pontos de um volume de concreto, dividida pela distância entre os mesmos (valor que será expresso em $^{\circ}\text{C}/\text{m}$).

Uma das grandes consequências trazidas pelas altas temperaturas atingidas pelo concreto é a ocorrência de fissuras de origem térmica. Essas fissuras de origem térmica podem surgir devido à uma restrição externa ao encurtamento da peça ou devido à uma restrição interna, isto é, na própria peça.

Pode-se afirmar que quando o elemento de concreto eleva a temperatura devido à liberação de calor, o concreto expande. A temperatura atinge o pico e depois começa a cair. Nessa queda de temperatura, a peça, que antes estava expandindo, começa a retrair. Caso não existe nenhum elemento externo a peça que restrinja essa movimentação, não haverá geração de tensões na interface entre a peça de concreto e o elemento restringente e a peça não fissurará.

Entretanto, se a peça estiver em contato com elemento de elevada rigidez, como uma rocha de elevado módulo de elasticidade e espessura, esse elemento vai restringir essa movimentação. Na fase de aquecimento, a peça de concreto em expansão será solicitada a compressão e a rocha a tração. Quando o pico de temperatura foi atingido e agora começa a retrair, os esforços se invertem, o concreto começa a sofrer esforços de tração na interface e a rocha esforços de compressão.

Pode-se afirmar, que no final do resfriamento as tensões seriam nulas, entretanto não é isso que ocorre. Durante o aquecimento, o concreto ainda tem baixa resistência e rigidez e

grande parte da tensão de compressão gerada é dissipada pelas propriedades de relaxação do concreto. Portanto, no pico de temperatura, a tensão de compressão residual é baixa ou nula. Quando o concreto começa a resfriar, o encurtamento gera esforço de tração, que o concreto não resiste e fissura.

As tensões de tração aumentam a medida que o concreto se resfria, sendo função da magnitude da retração, que depende da diferença entre a temperatura máxima atingida pelo elemento em relação a temperatura em um dado instante. O gradiente máximo atingido é quando o concreto entra em equilíbrio com o ambiente. O encurtamento máximo seria esse $\Delta H_{\text{máx}}$ vezes o coeficiente de dilatação térmica do concreto α . A tensão térmica de tração gerada, de modo simplista, é mostrada pela expressão do Quadro 4.

Quadro 4 – Tensão gerada pelo encurtamento do concreto devido ao resfriamento

$$\sigma_{\text{term de traçãomáx}} = E \cdot (\Delta H_{\text{máx}} \cdot \alpha) \cdot Cr$$

Fonte: adaptado de Mehta & Monteiro, 2013

Onde;

$\sigma_{\text{term de traçãomáx}}$ é a máxima tensão gerada pelo encurtamento do concreto devido ao resfriamento;

E é o módulo de elasticidade do concreto;

$\Delta H_{\text{máx}}$ é o gradiente máximo de temperatura atingido pelo concreto, que é a diferença entre o pico máximo de temperatura atingido pela peça e a temperatura ambiente;

α é o coeficiente de dilatação térmica do concreto;

Cr é o coeficiente de restrição ao encurtamento do concreto.

O coeficiente de restrição pode variar de 0 a 1. Se o coeficiente de restrição for nulo, situação em que a peça estivesse livre para se movimentar, sem que nenhum elemento restringisse a movimentação, as tensões geradas seriam nulas, independente do pico térmico atingido. Para o caso em que restrição seja 1, a tensão gerada é máxima.

Ao longo resfriamento, caso a resistência à tração do concreto seja inferior a tensão gerada devido ao encurtamento do concreto, a peça fissurará. Essas fissuras têm geralmente direção perpendicular à superfície de restrição, isto é, a interface entre a peça de concreto e o elemento restringente, podendo atingir toda a altura da peça. São fissuras que têm um espaçamento regular e pequena espessura, na ordem de décimos do milímetro.

Analisando a expressão, nota-se que quanto maior o gradiente de temperatura, maiores são as tensões desenvolvidas. Por-isso, uma ação eficiente para combater a fissuração térmica é reduzir a temperatura do concreto fresco, pois a temperatura máxima atingida é obtida pela expressão.

Quadro 5 – Temperatura máxima atingida pelo elemento de concreto

$$T_{\text{máx}} = T_L + T_{\text{hid}}$$

Fonte: adaptado de Mehta & Monteiro, 2013

Onde:

$T_{\text{máx}}$ é a temperatura máxima atingida pelo elemento de concreto;

T_L é a temperatura de lançamento;

T_{hid} é elevação máxima da temperatura devido ao calor de hidratação

A temperatura do concreto fresco fornecido por caminhão betoneira, sem adotar nenhuma ação de resfriamento geralmente é alguns graus acima da temperatura ambiente da região em que está sendo produzido. No Região Metropolitana de Recife, essa temperatura gira em torno de 35°C.

O resfriamento do concreto através do emprego de gelo em substituição a água de amassamento, do emprego de nitrogênio líquido, pode reduzir essa temperatura de lançamento para 25°C, 20°C, 15°C ou menos, reduzindo a temperatura máxima, o gradiente máximo e as tensões térmicas, minimizando a probabilidade de fissuração térmica.

Por outro lado, na expressão acima se observa que a $T_{\text{máx}}$ pode ser reduzida, não só atuando na temperatura de lançamento do concreto T_L , mas também na elevação máxima da temperatura devido ao calor de hidratação liberado pelo cimento T_{hid} . Os fatores que influenciam mais significativamente essa elevação são a geometria da peça, o tipo de cimento e o seu consumo no concreto.

No caso da geometria da peça é o exemplo de uma laje com espessura de 15cm, 20cm, mas possui uma área grande. Nesses casos a elevação será baixa e a temperatura máxima não vai ser muito superior a temperatura de lançamento do concreto, mesmo que o concreto tenha um cimento de elevado calor de hidratação e concreto elevado consumo de cimento, em função rápida dissipação de calor pela superfície.

Entretanto, se o elemento tiver a menor dimensão elevada, irá ocorrer acúmulo de calor e nesse caso o tipo de cimento e o seu consumo de cimento passam a ser fatores determinantes para reduzir essa elevação da temperatura devido as reações de hidratação do cimento.

Na engenharia, em situações em que as tensões térmicas pode ser problema, pode-se realizar um estudo térmico, utilizando atualmente, programas computacionais. Esse estudo determina a temperatura máxima que o concreto deve atingir para que a probabilidade de fissuração de origem térmica seja minimizada.

Compete a tecnologia do concreto estudar as possíveis ações para que essa temperatura não seja ultrapassada. Essas ações seriam adotar uma temperatura de lançamento para o concreto, aliada a uma dosagem com um consumo de cimento e tipo de cimento, que atenda todas necessidades de resistência, durabilidade e tensões térmicas.

Nesse estudo o calorímetro é de suma importância, pois é com esse equipamento em que as simulações de resfriamento, tipo de cimento e dosagens serão simulados para que a temperatura máxima não seja ultrapassada.

Uma outra possibilidade de fissuração de origem térmica é induzida por restrição interna. Essa possibilidade é mais remota, mas não impossível. Nesse caso, existe um gradiente térmico elevado entre a camada localizada próxima a superfície do elemento e o seu núcleo. A superfície quer retrair, mas o núcleo impede, gerando tensões de tração na superfície do concreto e levando à fissuração do concreto nessa camada.

Nesses casos, as fissuras têm tipologia tipo mapa ou casco de tartaruga, apresentando pequenas aberturas, na ordem de centésimo ou milésimo de milímetro.

Um outro problema relacionado com o aquecimento de elementos massivos de concreto é a formação de etringita tardia. É bastante comum confundir a DEF com a Reação Álcali-Agregado, já que ambas apresentam manifestações patológicas semelhantes.

Como o próprio nome já deixa claro, DEF é consequência da expansão tardia de um mineral chamado de etringita. A formação deste mineral resulta em uma expansão volumétrica e, consequentemente, na fissuração do concreto. Segundo Mehta e Monteiro (2013), a DEF ocorre quando o ataque de sulfato não tem sua fonte externamente, mas sim dentro do concreto. Outro fator importante é que a etringita não é estável a 65°C, ou seja, quando as temperaturas internas do concreto durante as primeiras idades são superiores a este valor, há a chance elevada da ocorrência de DEF.

Não existe uma medida corretiva após a ocorrência da DEF, por isso é de extrema importância tomar todos os cuidados necessários para que a mesma não se forme. Uma medida de destaque é o cuidado com a temperatura máxima alcançada pelo concreto.

2.4 Determinação normatizada do Calor de Hidratação

Antes de se elaborar maneiras de como analisar o desenvolvimento do calor de hidratação do cimento, é de grande importância o estudo das normas acessíveis que tratam deste assunto.

Existem duas normas brasileiras que regulamentam os experimentos para determinar o calor de hidratação do cimento e estas foram analisadas e discutidas no item 2.4.1 (a seguir).

Este trabalho não tem como objetivo se aprofundar na aplicação e nas especificações detalhadas das normas, porém foram usadas como base para o entendimento e compreensão do processo de determinação do calor de hidratação, sendo estas umas das principais fontes de inspiração para o desenvolvimento do calorímetro usado neste projeto.

2.4.1 NBR 8809 Cimento Portland - Determinação do calor de hidratação a partir do calor de dissolução - Método de ensaio

Este é o mesmo teste utilizado pela norma americana de nome ASTM C186-05 *Standard Test Method for Heat of Hydration of Hydraulic Cement*. Como o próprio nome deixa claro, esta norma regulamenta o experimento usado para determinação do calor de hidratação a partir do calor de dissolução. A NBR 8809 define calor de hidratação como a diferença entre os valores de calores de dissolução do cimento anidro e de uma porção separada dele que tenha sido parcialmente hidratado durante 7 dias ou 28 dias.

Para realização deste experimento, é necessário o preparo de uma pasta de cimento com 150 g (cento e cinquenta gramas) do cimento que se deseja avaliar com 60 mL (sessenta mililitros) de água destilada, após misturá-la por cinco minutos em um misturador mecânico, esta pasta é dividida e fica armazenada em tubos de plástico até o dia final do ensaio. Neste dia, é misturado o cimento parcialmente hidratado à uma mistura ácida dentro de um calorímetro que determina a quantidade de calor necessária para elevar a temperatura do calorímetro em 1 °C. Este processo é repetido para 3.000,00 g (três mil gramas) de cimento não hidratado. Com

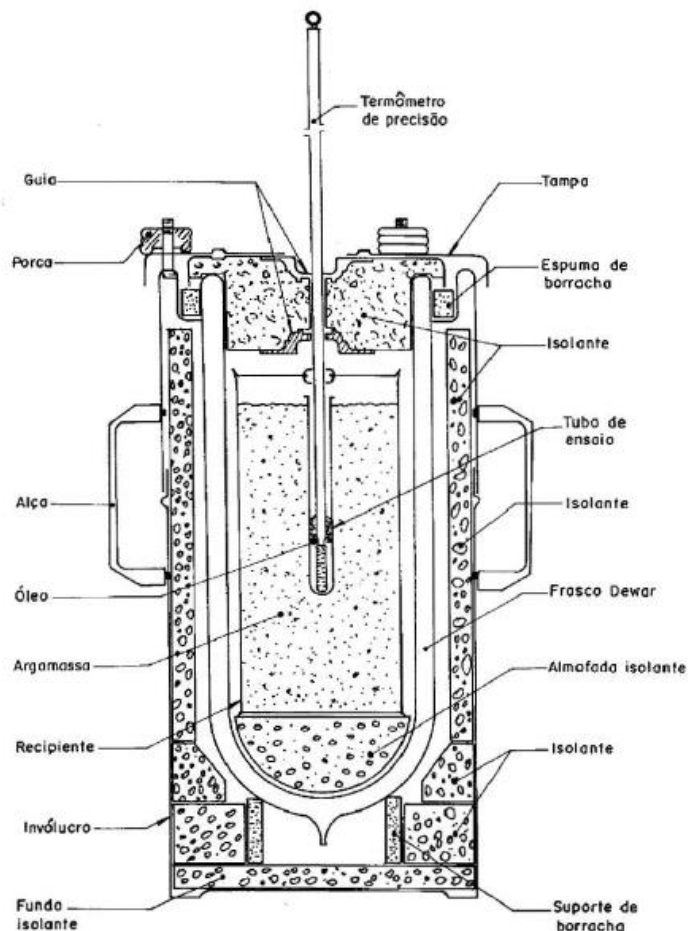
os valores coletados devidamente corrigidos pela eliminação dos fatores estranhos ao fenômeno, determinam-se as medidas do calor de dissolução das amostras e é calculada a diferença entre a amostra do cimento hidratado e o cimento anidro, sendo este o valor do calor de hidratação do cimento em estudo.

2.4.2 NBR 12006 Cimento – Determinação do calor de hidratação pelo método da garrafa de Langavant

Conforme indicado na norma, esta determina o calor de hidratação do cimento de forma contínua durante sete dias usando a garrafa de Langavant que nada mais é que um calorímetro semiadiabático.

A garrafa de Langavant é composta por uma ampola de vidro de parede dupla, espelhada com um forte vácuo entre as mesmas. Esta ampola de vidro é envolvida por um invólucro metálico de tampa isolante. Detalhe do calorímetro na Figura 1.

Figura 1 – Garrafa de Langavant



Fonte: ABNT NBR 12006, 1990

Usando um traço padrão determinado na norma, é produzida uma argamassa na qual 1.575,00 g (mil, quinhentos e setenta e cinco gramas) são separados e introduzidos na garrafa de Langavant. Os dados são coletados e corrigidos, sendo possível a determinação do calor de hidratação do cimento em estudo.

2.5 Funcionamento de um calorímetro

Como o grande objetivo deste trabalho é construir um calorímetro para determinar o calor de hidratação de diferentes cimentos, é de extrema importância entender o funcionamento deste equipamento e a finalidade do seu uso.

A palavra calorímetro é resultado da união de duas palavras “calori” e “métron” que significam calor e medir, respectivamente. Desta forma fica claro que um calorímetro é um equipamento utilizado para quantificar o calor produzido ou consumido, isto é, energia térmica de um corpo ou de uma reação entre diferentes elementos (DA SILVA, 1994).

Existem quatros tipos principais de calorímetro que são analisados nos subitens a seguir.

2.5.1 Calorímetro isotérmico

O próprio nome deixa claro que este é o calorímetro para o qual não há variação na temperatura durante o experimento: a temperatura do calorímetro e do meio externo permanecem iguais e constantes durante o processo enquanto o aparelho mede o fluxo de calor envolvido (DA SILVA, 1994).

2.5.2 Calorímetro isoperibol

A temperatura da vizinhança é mantida constante e levemente diferente da temperatura do calorímetro. Dessa forma, existe troca de temperatura entre ambos e esta é conhecida (DA SILVA, 1994).

2.5.3 Calorímetro de varrimento de temperatura

Este calorímetro permite a variação de temperatura ao longo do tempo de forma conhecida (linear) tanto para a vizinhança quanto para o sistema calorimétrico desde que a troca de calor entre ambos se dê através de uma resistência térmica definida (DA SILVA, 1994).

2.5.4 Calorímetro adiabático

O calorímetro adiabático ideal é o equipamento que não permite troca de energia térmica entre o meio interno e o externo durante todo o experimento.

O funcionamento deste último calorímetro é baseado na Primeira Lei da Termodinâmica. Esta estabelece que toda energia é conservada nas reações e transformações sofridas por todo e qualquer elemento. Desta forma, quando não há energia dissipada, é possível determinar a energia total da reação (DA SILVA, 1994).

Toda reação é acompanhada da absorção ou liberação de energia térmica e isso não é diferente para a hidratação do cimento, como já mostrado neste trabalho. Desta forma o calorímetro é o equipamento perfeito para a determinação desta energia liberada por esta reação.

Este trabalho é embasado no calorímetro adiabático, porém suas condições ideais são impossíveis de serem alcançadas, desta forma o calorímetro desenvolvido é semiadiabático e permite pequenas trocas de energia com o meio externo. Entretanto, caso essas trocas sejam grandes, existirá um erro acentuado entre a temperatura máxima a ser atingida em um regime adiabático (ideal), que ocorre em elementos massivos de concreto, e a temperatura máxima atingida no calorímetro projetado.

3 RELATÓRIO TÉCNICO DE CONSTRUÇÃO DO CALORÍMETRO

Esta seção tem como objetivo fornecer um relatório claro e detalhado de todo o processo construtivo do calorímetro utilizado no estudo térmico do concreto. Parte da escolha dos materiais adequados e do desenvolvimento de dois modelos (o segundo sendo o modelo final que veio a ser utilizado para o parágrafo 4 desse trabalho).

3.1 Escolha dos Materiais de composição

A escolha dos materiais usados no calorímetro foi baseada em três ideais principais: baixo custo, disponibilidade no mercado local e eficiência. Para alcançar esses objetivos foi feito um estudo prévio dos materiais com uma condutividade térmica compatível com o resultado desejado e quanto à disponibilidade. A escolha deste material é de grande importância, já que este será utilizado para isolar o concreto do meio externo envolvendo-o e permitindo o funcionamento correto do calorímetro semiadiabático.

Como já explicado anteriormente, condutividade térmica é a capacidade que um material tem de conduzir energia térmica, quanto maior seu valor, mais fácil será condução do calor por este material. Na Tabela 1 é possível observar diferentes valores deste fator para diferentes materiais.

Tabela 1 – Condutividade térmica de diferentes materiais

Material	Condutividade Térmica (cal/s)/(cm ² C/cm)	Condutividade Térmica (W/m K)*
Diamante	...	1000
Prata	1,01	406,0
Cobre	0,99	385,0
Ouro	...	314
Latão	...	109,0
Alumínio	0,50	205,0
Ferro	0,163	79,5
Aço	...	50,2
Chumbo	0,083	34,7
Mercurio	...	8,3
Gelo	0,005	1,6
Vidro comum	0,0025	0,8
Concreto	0,002	0,8

Material	Condutividade Térmica (cal/s)/(cm ² C/cm)	Condutividade Térmica (W/m K)*
Água a 20° C	0,0014	0,6
Fibra de vidro	0,00015	0,04
Feltro	0,0001	0,04
Lã (novelo)	...	0,04
Poliestireno	...	0,033
Poliuretano	...	0,02
Madeira	0,0001	0,12 - 0,04
Ar a 0° C	0,000057	0,024
hélio (20°C)	...	0,138
Hidrogênio (20°C)	...	0,172
Nitrogênio (20°C)	...	0,0234
Oxigênio (20°C)	...	0,0238

Fonte: Young, 1987

É possível perceber que os dois melhores materiais para a construção de um calorímetro são o poliuretano e poliestireno. O poliuretano é um polímero que pode apresentar diferentes densidades e, conseqüentemente, diferentes propriedades isolantes a depender do seu processo de produção.

Inicialmente, foi projetado um calorímetro usando apenas o poliestireno como material isolante, sendo denominado primeiro modelo. O segundo modelo faz uso do poliuretano e do poliestireno. O desempenho destes dois projetos é discutido nos itens 3.3.3 e 4.1.

Para o primeiro modelo foi usado poliestireno, comercialmente conhecido como isopor. Foi escolhido um isopor com densidade que apresente uma menor condutividade térmica e que forneça ao calorímetro resistência e durabilidade suficientes para realização dos testes. Tomando como base estes fatores, concluiu-se que uma densidade mais elevada seria a melhor escolha para se alcançar o desempenho esperado.

Já para o segundo projeto foi definido o uso do poliuretano na parte mais próxima do concreto e, envolvendo o poliuretano, o poliestireno. O isopor usado no projeto inicial foi o mesmo adotado para o segundo projeto. Para o poliuretano foi escolhida espuma expansiva de poliuretano, a qual tem um rendimento de 20 litros por 500 mililitros usados.

3.2 Equipamento de aferição

Outro ponto de grande importância na criação do calorímetro é a escolha do equipamento que colherá e armazenará os dados buscados, isso é, a temperatura do concreto ao longo do tempo do experimento. Para esta função foi utilizado o equipamento da Figura 2.

Figura 2 – Equipamento de aferição utilizado



Fonte: autor

Este equipamento tem capacidade de registrar a temperatura de até 3 ambientes diferentes, armazenando os dados em intervalos de tempo iguais definidos pelo usuário. Para

este trabalho o intervalo de tempo de armazenamento foi de 120 segundos e para dois pontos diferentes: o interior do concreto e o ambiente externo ao calorímetro.

É importante deixar claro que para os dois calorímetros foi usado o mesmo equipamento de coleta de temperatura, com o objetivo de manter os mesmos parâmetros para os dois equipamentos.

3.3 Primeiro modelo

Para definição do calorímetro foi realizado um teste com o primeiro modelo com o objetivo de analisar se o projeto inicial para o equipamento alcançaria o desempenho necessário para o estudo térmico do concreto. Este item tem como objetivo demonstrar o processo construtivo deste equipamento e o procedimento do teste inicial.

Um dos grandes desafios no processo prévio à construção do calorímetro protótipo foi determinar o recipiente que armazenaria o concreto durante os testes. Este foi um desafio porque a escolha do recipiente teria que satisfazer os seguintes pontos: ser reutilizável, não fornecer dificuldades para concretagem, facilitar a remoção do recipiente após realização do teste e apresentar um volume suficientemente satisfatório.

Tomando estes fatores como base, foi escolhido o recipiente de sete litros de volume (Figura 3).

Figura 3 – Recipiente (primeiro modelo)



Fonte: autor

Em posse do recipiente que armazena o concreto durante o teste, o próximo ponto foi determinar a forma como o recipiente será envolvido. Assim, foi definido que o isopor deveria

ter dimensões constantes, garantindo o isolamento uniforme do concreto. Já que o recipiente tem um formato aproximadamente cilíndrico (é um tronco de cone de pequeno ângulo – facilita remoção do concreto), este foi o formato adotado para o isopor, em consequência do raio constante que envolverá o recipiente.

A fim de aumentar a capacidade isolante do calorímetro do primeiro modelo, foi definido o seguinte dimensionamento para o isopor: as paredes de isopor que envolvem o recipiente têm 10 centímetros de espessura, a tampa e o fundo do calorímetro também medem 10 centímetros de forma a isolar o recipiente uniformemente em todas as direções. Já as dimensões internas foram definidas em consequência das dimensões do recipiente.

3.3.1 Construção do primeiro modelo

Em posse de todo o material necessário para a construção do calorímetro inicial, foi possível avançar para a construção.

O ponto mais importante desta etapa foi garantir o máximo isolamento possível do recipiente impossibilitando a troca de energia térmica com o meio externo e otimizando a eficiência do calorímetro. A partir destas premissas, o isopor foi cortado de forma a envolver totalmente o recipiente acompanhando a pequena variação de diâmetro que o recipiente possui.

Concluindo o dimensionamento das paredes laterais de isopor do calorímetro, a parte superior e a parte inferior assumiram a forma de um cilindro de altura de 45 centímetros e diâmetro de 30 centímetros.

3.3.2 Primeiro modelo finalizado

Ao fim de todo processo explicado acima, o resultado foi o calorímetro que pode ser observado nas Figuras 4 e 5.

Figuras 4 e 5 – Primeiro modelo

Fonte: autora

Este equipamento pode ser transportado e armazenado com bastante facilidade e tem capacidade volumétrica para sete litros de concreto.

3.3.3 Teste do primeiro modelo

Ao final da construção do primeiro modelo, foi realizado um teste inicial a fim de analisar a capacidade do equipamento e observar as dificuldades e facilidades de trabalhar com o mesmo, definindo possíveis pontos de melhoria.

O primeiro ponto analisado foi definir a melhor forma de usar o recipiente garantindo a possibilidade de reuso do mesmo. A alternativa encontrada foi utilizando um saco plástico, no qual o concreto seria lançado e, após o teste, seria retirado conservando o recipiente.

O segundo passo foi a determinação do traço da argamassa escolhida para o teste inicial. Como o objetivo deste teste não envolve a determinação do traço padrão do experimento em estudo, o traço adotado nada influencia no traço que será estudado em seguida (Tabela 2). Observe-se que o mesmo apresenta um consumo teórico de 500 kg/m³ de cimento CP II-Z-32. A temperatura de lançamento foi de 25°C.

Tabela 2 – Traço e argamassa

TRAÇO		
Cimento	Areia	Água
1.00	3.00	0.55

Fonte: autora

Ao fim da pesagem do material para alcançar as quantidades determinadas no traço acima, os mesmos foram misturados com auxílio de uma argamassadeira, alcançando a pega sem apresentar nenhuma dificuldade.

Antes do lançamento da argamassa no calorímetro, foi preparada a haste que irá armazenar o termopar. Para o funcionamento deste equipamento deve ser adicionada água na haste, facilitando a transferência de calor entre o concreto e o termopar (a extremidade inferior da haste é vedada).

Concluída a mistura, a argamassa foi lançada em camadas sucessivas com o objetivo de facilitar a compactação evitando a presença de espaços vazios no corpo de prova.

A temperatura inicial, isso é, ao fim do lançamento da argamassa, foi medida e seu resultado foi de 25,0°C (Figura 6).

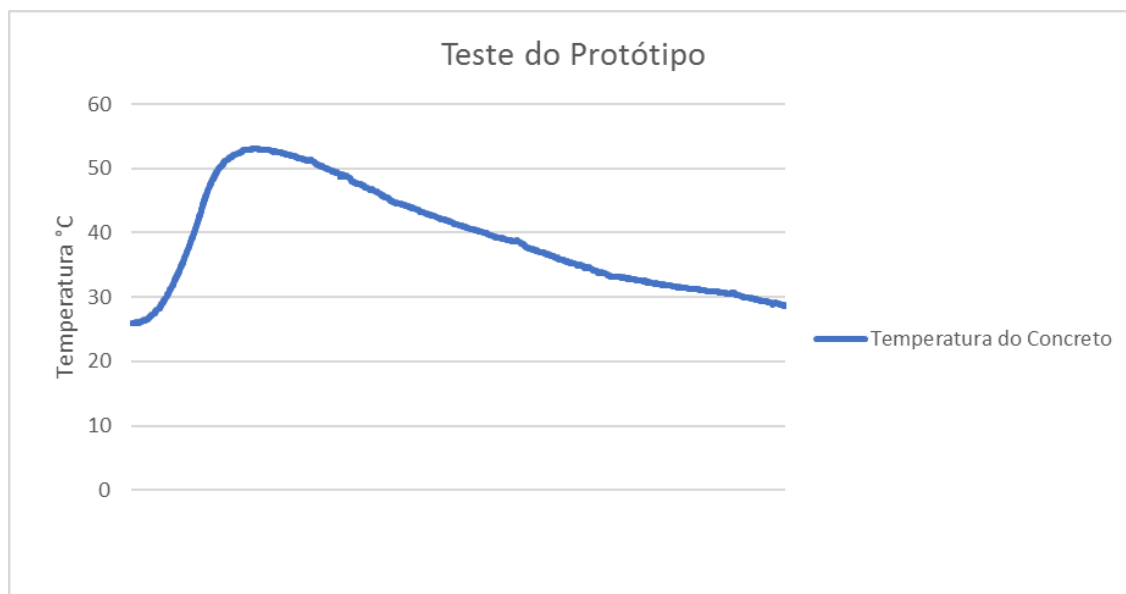
Figura 6 – Termômetro indicando temperatura no lançamento da argamassa



Fonte: autora

O equipamento foi programado para armazenar a temperatura da argamassa a cada 120 segundos e o experimento teve duração total de setenta e quatro horas. Estes dados recolhidos foram plotados com auxílio do Excel e abaixo é possível analisar o desenvolvimento e variação da temperatura em função do tempo (Gráfico 1).

Gráfico 1 – Variação de temperatura versus tempo para argamassa



Fonte: autora

É possível observar que a temperatura máxima foi de 53,0 °C após 18 horas e 38 minutos de teste.

Ao fim deste experimento, foi concluído que o procedimento adotado é satisfatório para a continuação do estudo térmico do concreto, porém este modelo inicial não apresentou capacidade isolante suficiente para os testes, já que a argamassa não atingiu a temperatura máxima imaginada. Além disso, houve um acréscimo significativo de temperatura nas faces externas de isopor do calorímetro, esta variação de temperatura foi percebida através da sensação térmica ao toque. Este fato deixou claro que o calor estava sendo dissipado para o meio externo. Outra conclusão importante alcançada por meio deste teste é que o recipiente escolhido não apresentou a utilidade esperada de facilitar a remoção do concreto, pois ainda se fez necessário o uso de sacolas plásticas para a remoção do corpo de prova. Desta forma, foi escolhido por eliminar o uso do recipiente, apenas utilizando a sacola plástica.

3.4 Segundo modelo

Como falado anteriormente, este modelo foi proposto com o objetivo de melhorar a capacidade isolante do calorímetro adicionando o poliuretano expandido e aumentando as dimensões das paredes de isopor do equipamento.

3.4.1 Construção do segundo modelo

O processo construtivo do segundo modelo seguiu com o mesmo procedimento do protótipo, porém ocorreu o processo de moldagem do poliuretano expandido. Para esta etapa foi usado uma fôrma na qual o poliuretano foi lançado e armazenado até expandir por completo e tomar a forma desejada.

3.4.2 Resultado

Ao fim da construção do equipamento, foi obtido o calorímetro, conforme figuras a seguir (Figuras 7 e 8), onde se destaca o detalhe do poliuretano internamente, avermelhado.

Figuras 7 e 8 – Segundo modelo



Fontes: autora

O calorímetro é composto por uma camada interna de poliuretano expandido em formato cilíndrico com espessura de 10 cm, 23 cm de raio externo e 13 cm de raio interno. Envolvendo o poliuretano, existe uma camada com 20 cm de espessura de isopor, o resultado é um calorímetro cilíndrico com raio total de 43 cm existindo, internamente um espaço, também cilíndrico, para o lançamento do concreto com raio de 13 cm. Verticalmente, o calorímetro é composto por uma tampa e um fundo de dimensões iguais de raio 43 cm e alturas 30 cm, esta mesma altura foi usada para parte central do calorímetro, isso é, a parte que envolve lateralmente o poliuretano e o concreto. O calorímetro fica projetado para um volume de

15927,87 cm³ de concreto (aproximadamente 16 litros). O esquema do mesmo é melhor visualizado com auxílio da Figura 9.

Figura 9 – Esquema e dimensões do calorímetro (segundo modelo)

Esquema do segundo modelo

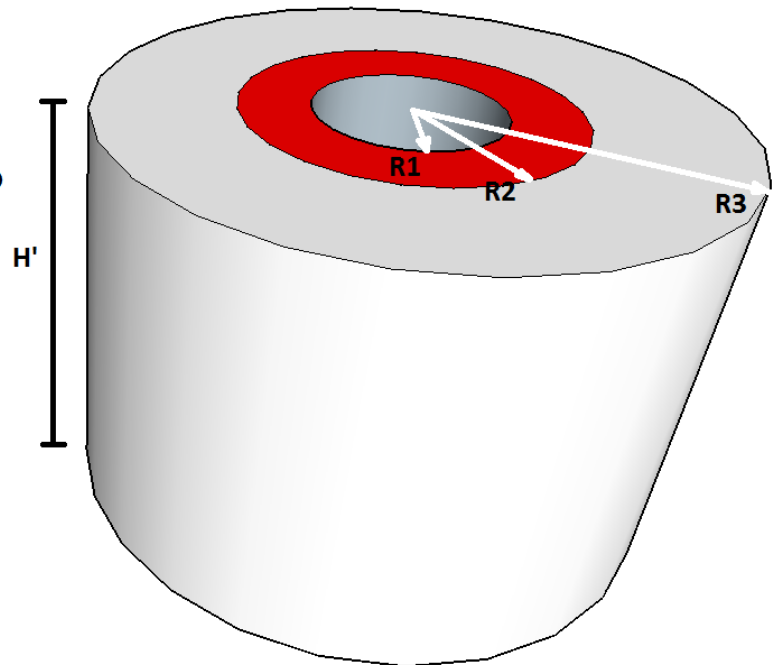
Dados:

R1 = 13 cm (raio interno)

R2 = 23 cm (raio externo -poliuretano)

R3 = 43 cm (raio externo - isopor)

H' = 60 cm (altura sem a tampa)



Fonte: autora

4 REALIZAÇÃO DOS TESTES

Em posse do calorímetro, serão seguidas duas séries de testes. A primeira será a comparação entre as temperaturas alcançadas para concretos de mesmo traço, porém com três tipos de cimento diferentes: CPV, CPIII e CPII Z-32. O objetivo deste teste é classificar estes três cimentos quanto às temperaturas alcançadas em um mesmo período de tempo, desta forma será possível definir qual dos cimentos apresenta maior calor de hidratação.

A segunda série de testes utiliza o mesmo cimento variando apenas seu consumo; analisando, assim, a sua influência nas temperaturas atingidas pelo concreto. A segunda série de testes será realizada com o CPII Z-32.

4.1 Primeira série de testes – avaliação para diferentes tipos de cimento

Como afirmado anteriormente, a primeira série de testes comparará três tipos de cimentos diferentes com a finalidade comparar a evolução da temperatura e do calor hidratação.

Os cimentos escolhidos são de uso frequente nas construções da Região Metropolitana do Recife.

Para a realização deste experimento foi fixado um traço padrão para todos os cimentos testados. É importante deixar claro que os procedimentos realizados durante os testes foram sempre os mesmos, eliminando a necessidade de discuti-los para todos os testes. Os procedimentos detalhados serão expostos apenas no item 4.1.1, já que só muda o tipo de cimento entre os itens 4.1.1, 4.1.2 e 4.1.3.

4.1.1 Teste do CPV

O teste teve início com a pesagem e separação dos materiais que compõem o concreto. O traço unitário do concreto pode ser observado na Tabela 3.

Tabela 3 – Traço unitário, primeira série, CPV

TRAÇO UNITÁRIO			
CIMENTO	AREIA	BRITA	A/C
1.00	1.77	2.56	0.48

Fonte: autora

Outros fatores característicos do concreto foram determinados e podem ser observados na Tabela 4.

Tabela 4 – Demais parâmetros do concreto, primeira série, CPV

OUTROS PARÂMETROS					
Relação Água/Materiais Secos (A%)	Teor de Argamassa Seca (a%)	Agregados Secos/Cimento (m)	Consumo (kg/m ³)	Massa Específica (kg/m ³)	Consumo Real de Cimento (kg/m ³)
9.00	52.00	4.33	413.80	2365.00	406.80

Fonte: autora

Para todos os outros experimentos realizados com outros cimentos, a tabela apresentará os mesmos valores variando apenas a massa específica e o consumo real do concreto.

Todos os componentes foram misturados na betoneira e quando ocorreu a pega, foi realizado o teste de abatimento, isso é, o “*Slump Test*”, o teste pode ser observado nas Figura 10.

Figura 10 – Teste de abatimento, primeira série, CPV



Fonte: autora

Este teste foi realizado em acordo com a norma NBR NM 67 – 1998, o objetivo deste teste é determinar a consistência do concreto ainda fresco a partir do seu assentamento. Para este concreto testado o abatimento foi de 200 mm.

Finalizando o teste, o concreto foi lançado no calorímetro e sua temperatura ao lançamento foi registrada (29,5 °C) com auxílio de um termômetro, conforme indicado na Figura 11.

Figura 11 – Registro da temperatura de lançamento, primeira série, CPV



Fonte: autora

Após lançamento, o termopar foi instalado no meio do volume de concreto e o equipamento de aferição foi programado para armazenar a leitura da temperatura a cada dois minutos. Abaixo, é possível observar equipamento em funcionamento aferindo a temperatura ambiente e a temperatura interna do concreto (Figuras 12 e 13).

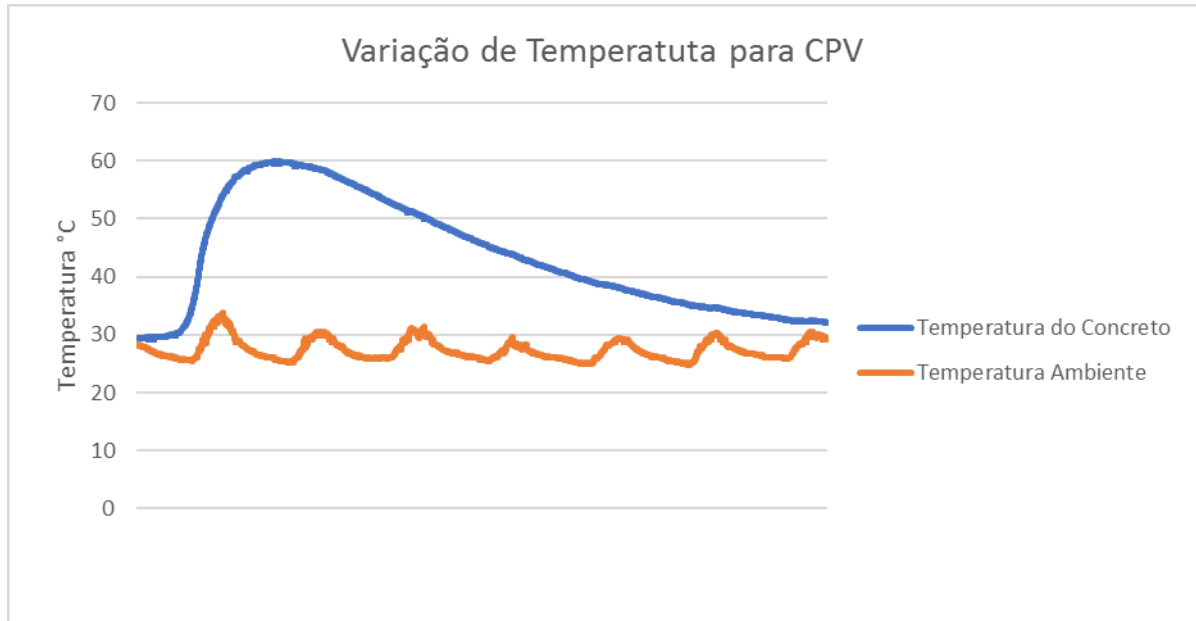
Figuras 12 e 13 – Início do registro



Fonte: autora

Ao fim do teste, foi possível coletar as temperaturas alcançadas pelo concreto e pelo ambiente externo a cada 120 segundos, abaixo é exposto o gráfico resultante deste teste (Gráfico 2).

Gráfico 2 – Temperatura versus tempo, primeira série, CPV



Fonte: autora

Analisando o Gráfico 2, a temperatura máxima foi de 59,9 °C atingida após 1998 minutos.

4.1.2 Teste do CII-Z-32

Como falado anteriormente, os procedimentos para este teste seguiram todos os acima expostos, não existindo assim necessidade de repeti-los.

O procedimento anterior (4.1.1) foi reproduzido com o cimento CII-Z-32. O traço unitário e os parâmetros para o concreto dosado ficam expostos nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5 – Traço unitário, primeira série, CII-Z-32

TRAÇO UNITÁRIO			
Cimento	Areia	Brita	a/c
1.00	1.77	2.56	0.48

Fonte: autora

Tabela 6 – Demais parâmetros do concreto, primeira série, CII-Z-32

OUTROS PARÂMETROS					
Relação Água/Materiais Secos (A%)	Teor de Argamassa Seca (a%)	Agregados Secos/Cimento (m)	Consumo (kg/m ³)	Massa Específica (kg/m ³)	Consumo Real de Cimento (kg/m ³)
9.00	52.00	4.33	413.80	2340.00	402.50

Fonte: autora

Os únicos itens que variaram foram a massa específica e o consumo real do cimento, já que o consumo real depende da massa específica e esta, mesmo para um mesmo concreto, pode apresentar pequenas variações a depender da compactação e arranjo dos agregados.

Após a mistura dos elementos componentes do concreto, foi realizado o teste de abatimento, o qual resultou em um valor de 180 mm (Figura 14), bastante semelhante ao teste anterior.

Figura 14 – Teste de abatimento, primeira série, CII-Z-32



Fonte: autora

Quando lançado no calorímetro, o concreto apresentou uma temperatura de 27,5°C (Figura 15).

Figura 15 – Temperatura de lançamento, primeira série, CPlI-Z-32



Fonte: autora

Por fim, o equipamento foi instalado e iniciado a armazenagem dos dados (Figuras 16 e 17).

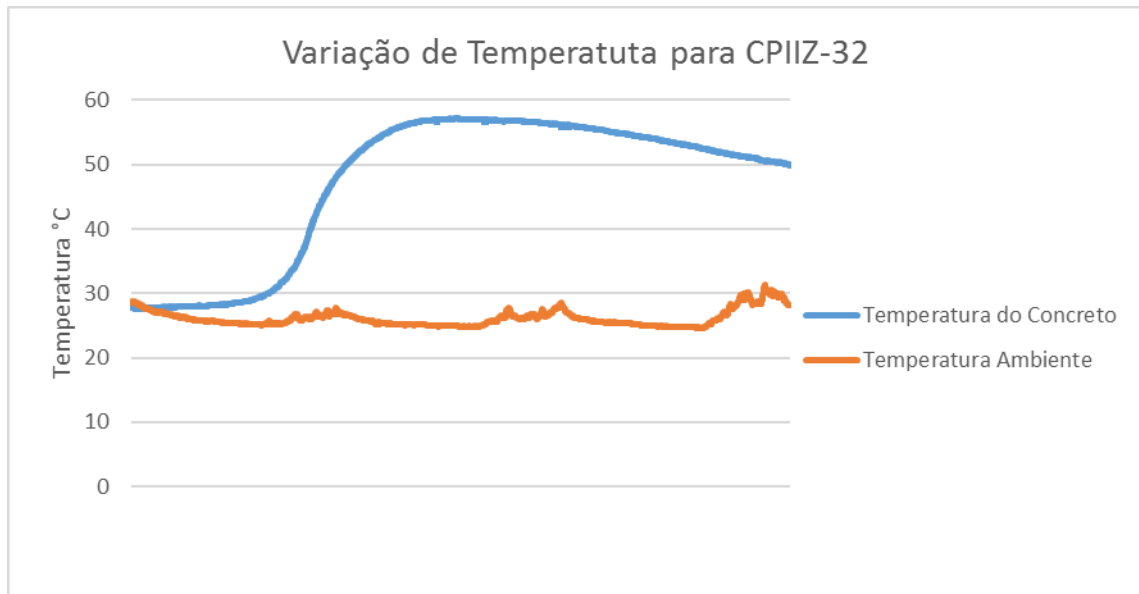
Figuras 16 e 17 – Início do registro



Fontes: autora

Já a variação da temperatura do concreto com o tempo durante o teste completo, pode ser analisada no Gráfico 3.

Gráfico 3 – Temperatura versus tempo, primeira série, CII-Z-32



Fontes: autora

O concreto atingiu a temperatura máxima de 57,1°C após 2066 minutos de teste.

4.1.3 Teste do CIII

Todo o procedimento utilizado para a realização deste teste foi idêntico ao processo dos testes anteriores, porém o cimento utilizado foi o CIII. O traço adotado foi o mesmo e os parâmetros podem ser observados abaixo nas Tabelas 7 e 8.

Tabela 7 – Traço unitário, primeira série, CIII

TRAÇO UNITÁRIO			
Cimento	Areia	Brita	a/c
1.00	1.77	2.56	0.48

Fonte: autora

Tabela 8 – Demais parâmetros do concreto, primeira série, CIII

OUTROS PARÂMETROS					
Relação Água/Materiais Secos (A%)	Teor de Argamassa Seca (a%)	Agregados Secos/Cimento (m)	Consumo (kg/m³)	Massa Específica (kg/m³)	Consumo Real de Cimento (kg/m³)
9.00	52.00	4.33	413.80	2323.00	399,60

Fonte: autora

Para este concreto o abatimento atingido foi de 190 milímetros (Figura 18), também muito semelhante aos atingidos nos testes anteriores.

Figura 18 – Teste de abatimento, primeira série, CPIII



Fonte: autora

Finalizando o teste de abatimento, o concreto foi lançado no calorímetro a uma temperatura de 27,50 °C conforme indicado na Figura 19.

Figura 19 – Temperatura de lançamento, primeira série, CPIII



Fonte: autora

Abaixo, é possível analisar o equipamento operando e armazenando os primeiros dados (Figuras 20 e 21).

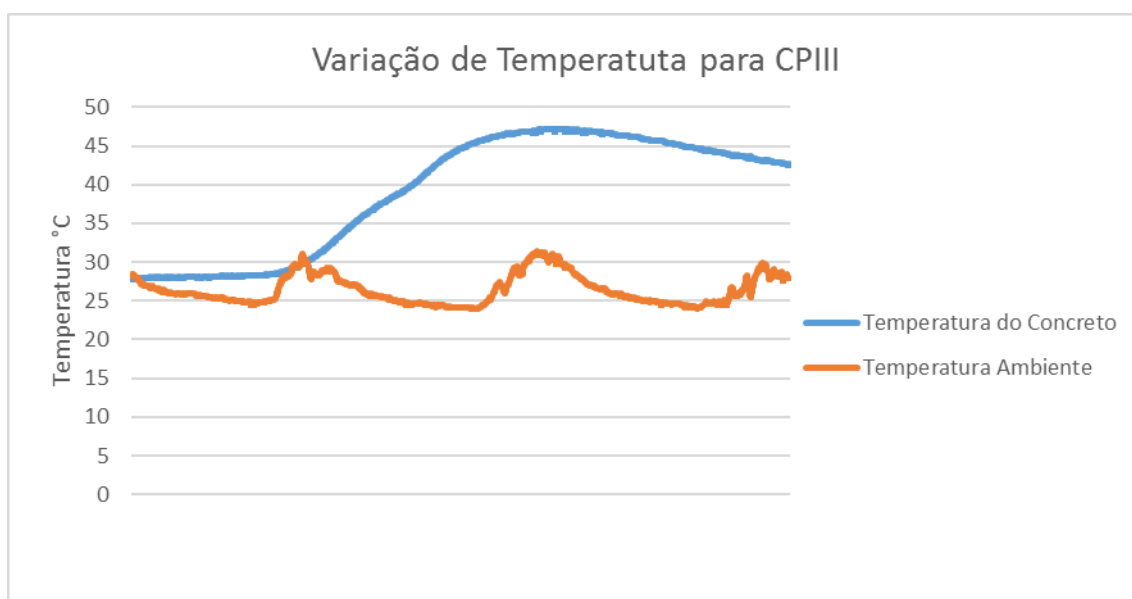
Figuras 20 e 21 – Início do registro



Fonte: autora

Por fim, a variação da temperatura do concreto foi aferida resultando no gráfico indicado a seguir (Gráfico 4).

Gráfico 4 – Temperatura versus tempo, primeira série, CPIII



Fonte: autora

A temperatura máxima alcançada pelo concreto foi de 47,20 °C após 2704 minutos de teste.

4.2 Segunda série de testes – avaliação para diferentes consumos de um mesmo cimento

A segunda série de testes foi a análise da variação de temperatura do concreto fixando o cimento e variando o seu consumo, isso é, a quantidade, em massa, de cimento usada para cada metro cubico de concreto produzido.

Para a realização deste teste, foi tomado como base de estudo o cimento CII-Z-32 do item 4.1.2 acima. Foram produzidos dois novos concretos com consumo de 300 e 500 kg/m³. Sabendo que o concreto do item 4.1.2 teve um consumo de 400 kg/m³, estes dois novos tiveram suas temperaturas registradas e comparadas.

O objetivo deste teste é analisar a influência que o consumo de cimento tem sobre as temperaturas alcançadas pelo concreto. Como já estudado anteriormente, são esperadas temperaturas superiores para concretos com consumos mais elevados.

Todo o procedimento adotado na segunda série de testes foi idêntico ao procedimento utilizado na primeira série de testes, mais especificamente o procedimento descrito no item 4.1.1.

4.2.1 CII-Z-32 com consumo de 300 kg/m³

Todo o material do concreto foi pesado e misturado até de a pega do concreto. Atingindo este estado, foi realizado o teste de abatimento e o valor obtido foi de 170 milímetros, conforme Figuras 22 e 23.

Figuras 22 e 23 – Abatimento para concreto de consumo de 300 kg/m³



Fonte: autora

Após o teste de abatimento, o concreto foi lançado no calorímetro para o início do teste. A temperatura de lançamento foi registrada e teve um valor de 26,5 °C (Figura 24).

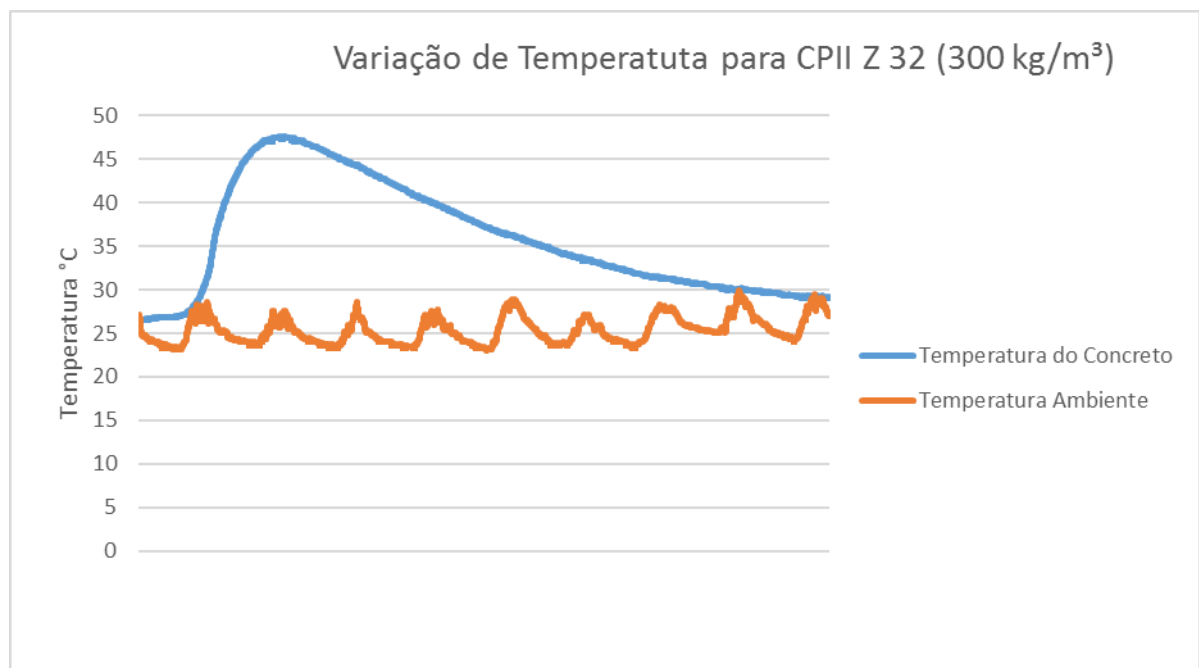
Figura 24 – Temperatura de lançamento para concreto de consumo de 300 kg/m³



Fonte: autora

As temperaturas do concreto foram registradas e podem ser analisadas no Gráfico 5

Gráfico 5 – Temperatura versus tempo, segunda série, CII-Z-32 (300 kg/m³)



Fonte: autora

Para este teste a temperatura máxima foi de 47,6°C após 2698 minutos.

4.2.2 CII-Z-32 com consumo de 500 kg/m³

Este foi o teste realizado com o maior consumo de cimento. Como de padrão, o teste de abatimento foi feito e foi registrado um valor de 160 milímetros, conforme Figura 25.

Figura 25 – Abatimento para concreto de consumo de 500 kg/m³



Fonte: autora

Ao fim do teste de abatimento, foi iniciado o teste com o calorímetro, a temperatura inicial do concreto foi de 26,5°C (Figura 26).

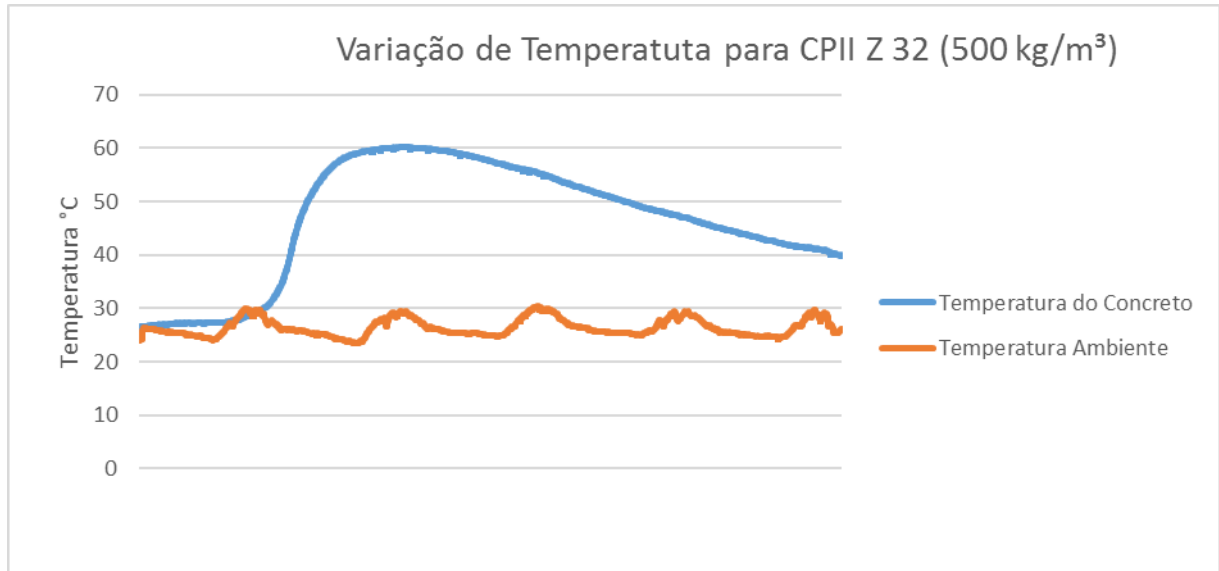
Figura 26 – Temperatura inicial para concreto de consumo de 500 kg/m³



Fonte: autora

A variação da temperatura do concreto em estudo pode ser observada no Gráfico 6

Gráfico 6 – Temperatura versus tempo, segunda série, CPH-Z-32 (500 kg/m³)



Fonte: autora

A temperatura máxima obtida foi de 60,3°C após 2672 minutos de teste.

5 ANÁLISE DE RESULTADOS

5.1 Máxima temperatura para os diferentes cimentos

Foram comparadas as temperaturas máximas atingidas para concretos de mesmo traço, mas com tipos de cimento diferentes, os tipos comparados foram o CPV ARI, CPII-Z-32 e o CPIII. Como a única diferença entre os três concretos testados foi o cimento utilizado, este é o único responsável pela diferença nas temperaturas máximas atingidas.

O cimento que atingiu a temperatura mais elevada foi o CPV ARI. Como já discutido anteriormente, este o cimento de alta resistência inicial em consequência das suas partículas mais finas que hidratam mais rápido, desta forma, este também foi o cimento que alcançou a temperatura máxima em um intervalo de tempo mais curto, deixando clara a influência do tamanho dos grãos do cimento com o tempo de hidratação.

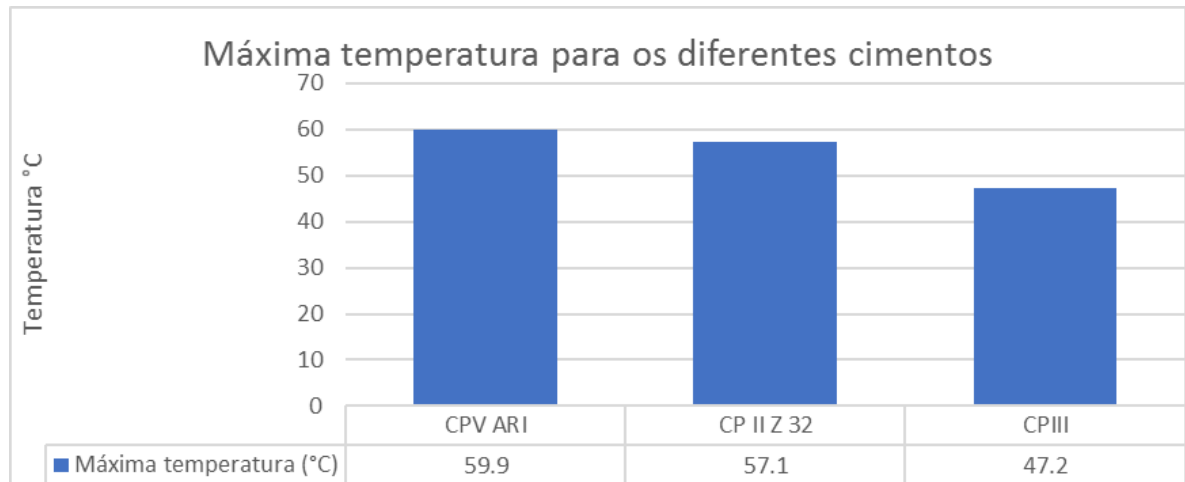
O cimento com a menor temperatura máxima foi o CPIII, este teve um comportamento oposto ao do CPV ARI, pois teve a menor temperatura em um maior intervalo de tempo. O CPIII é o cimento com adição de escória de alto forno, a consequência desta adição é a redução do calor de hidratação, que pode ser constatada com o teste realizado.

O resumo dos resultados pode ser observado Tabela 9, Gráfico 7 e Gráfico 8.

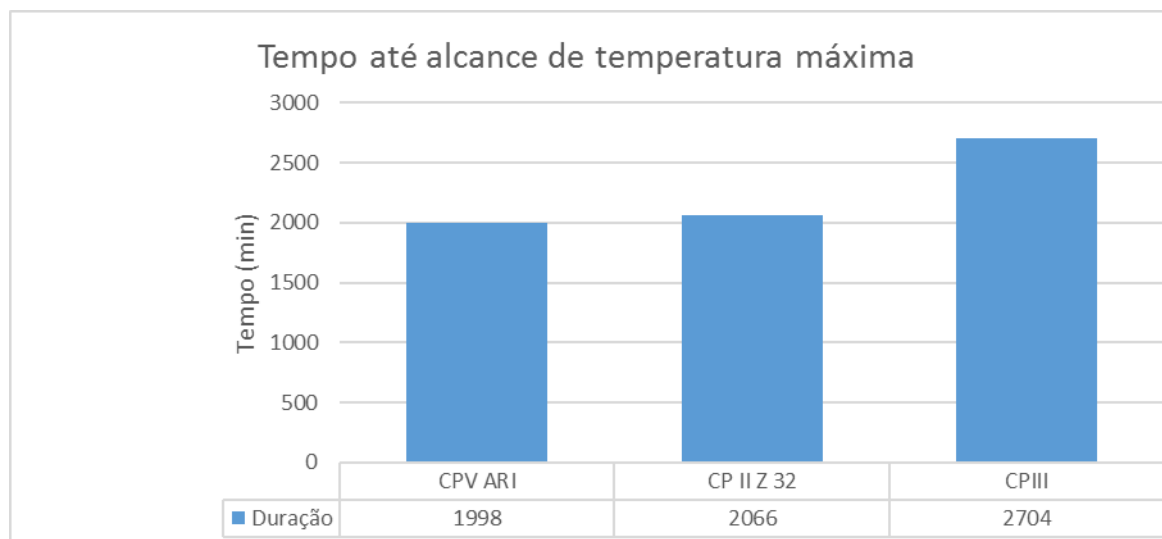
Tabela 9 - Resumo dos resultados primeira série

CIMENTO	TEMPERATURA MÁXIMA (°C)	DURAÇÃO (min)
CPV ARI	59.9	1998
CP II Z 32	57.1	2066
CPIII	47.2	2704

Fonte: autora

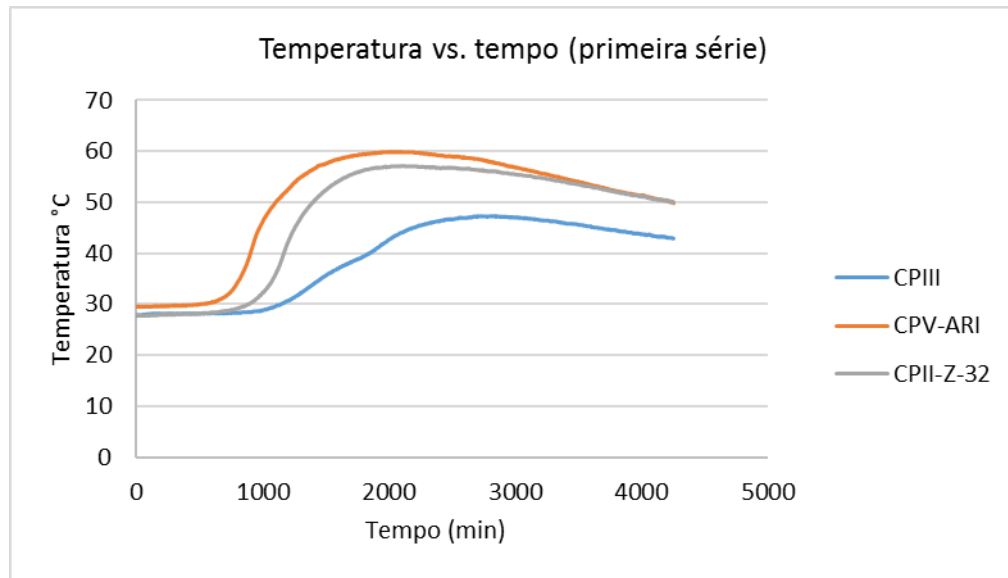
Gráfico 7 - Resumo das temperaturas primeira série

Fonte: autora

Gráfico 8 - Resumo dos tempos primeira série

Fonte: autora

Para facilitar a comparação da variação das temperaturas para cada cimento, foi criado o Gráfico 9.

Gráfico 9 – Comparação da variação das temperaturas

Fonte: autora

5.2 Máxima temperatura para os diferentes consumos do cimento

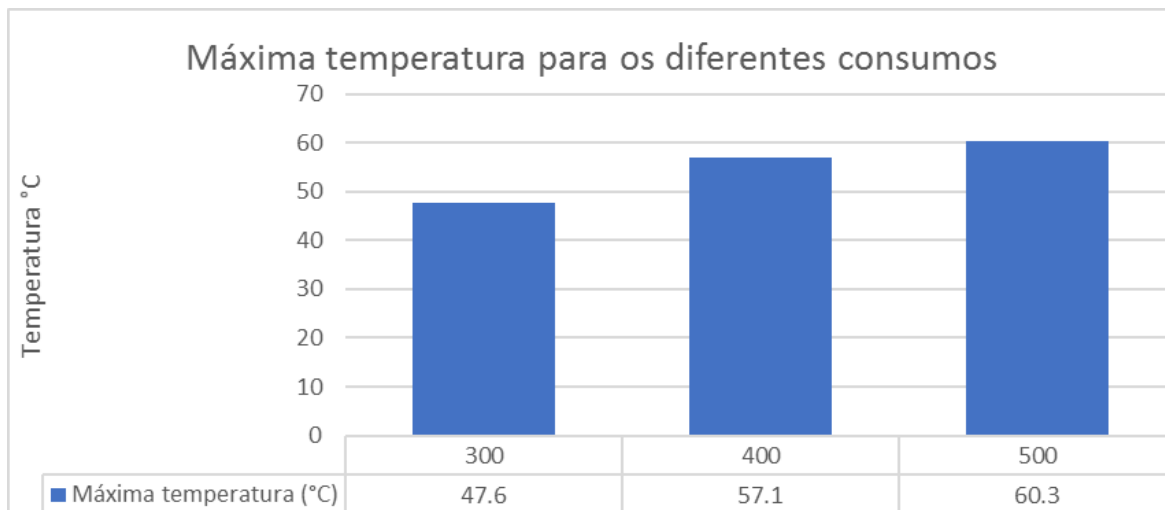
A segunda série de testes teve como objetivo a comparação das temperaturas alcançadas para diferentes consumos de cimento. A Tabela 10 apresenta o resumo dos resultados coletados.

Tabela 10 - Resumo dos resultados segunda série

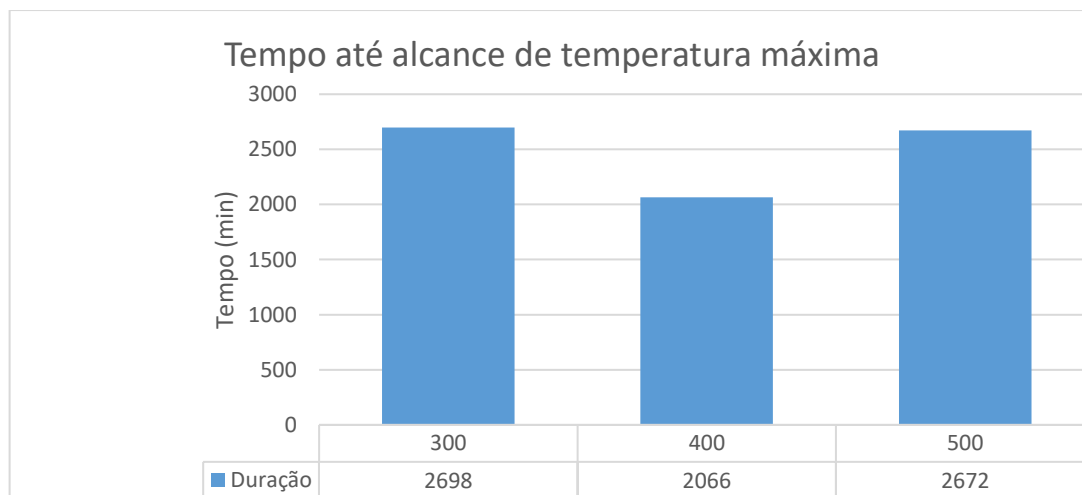
CONSUMO (kg/m ³)	TEMPERATURA MÁXIMA (°C)	DURAÇÃO (min)
300	47.6	2698
400	57.1	2066
500	60.3	2672

Fonte: autora

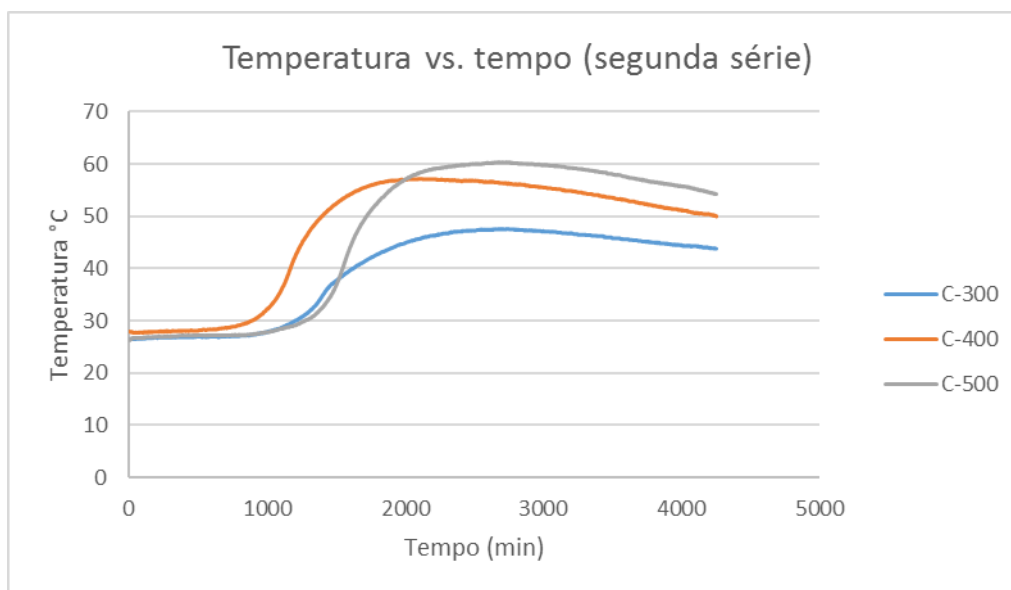
A comparação dos resultados pode ser observada nos Gráfico 10, Gráfico 11 e Gráfico 12.

Gráfico 10 - Resumo das temperaturas segunda série

Fonte: autora

Gráfico 11 - Resumo dos tempos segunda série

Fonte: autora

Gráfico 12 - Comparação da variação das temperaturas

Fonte: autora

Como já esperado, o concreto de maior consumo resultou em uma maior temperatura máxima, já o cimento de menor consumo, apresentou temperaturas inferiores. Um fato que poderá ser estudando em futuras pesquisas é a diferença entre o tempo de duração do concreto de 400 kg/m³ e os dois, conforme indicado no Gráfico 11.

6 ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO CALORÍMETRO

Tomando como base os dados coletados na primeira e segunda série de testes, foi analisada a eficiência do calorímetro desenvolvido. Esta análise foi realizada com o cálculo do coeficiente de elevação adiabática para cada cimento, sendo este coeficiente comparado com valores teóricos esperados.

Este coeficiente é a relação entre a máxima temperatura alcançada pelo concreto e o seu consumo de cimento. É importante deixar claro que esta máxima temperatura deve ser subtraída da temperatura inicial, isto é, temperatura de lançamento do concreto.

A primeira série de testes forneceu dados para o cálculo do coeficiente de elevação adiabática para cada tipo de cimento estudado. Este valor calculado será comparado com valores teóricos esperados para estes cimentos.

A segunda série de testes foi utilizada para analisar se o coeficiente calculado para o CP II-Z-32 permaneceu constante para os diferentes consumos testados. Esta análise é possível já que o coeficiente deve ser o mesmo para cada tipo de cimento.

A Tabela 11 relaciona os tipos de cimento com seu consumo real e o coeficiente de elevação adiabático calculado.

Tabela 11 – Coeficiente de elevação adiabática para diferentes cimentos

CIMENTO	TEMPERATURA INICIAL (°C)	TEMPERATURA MÁXIMA (°C)	CONSUMO (kg/m³)	COEFICIENTE OBTIDO (°Cm³/kg)
CPV ARI	29.5	59.9	400	0.076
CP II Z 32	27.5	57.1	400	0.074
CPIII	27.5	47.2	400	0.049

Fonte: autora

A Tabela 12 relaciona os coeficientes obtidos para os diferentes consumos de cimento testados neste trabalho. Como o cimento analisado na segunda série de testes foi o mesmo, era esperado que o coeficiente permanecesse constante, porém houve uma pequena variação que é observada abaixo

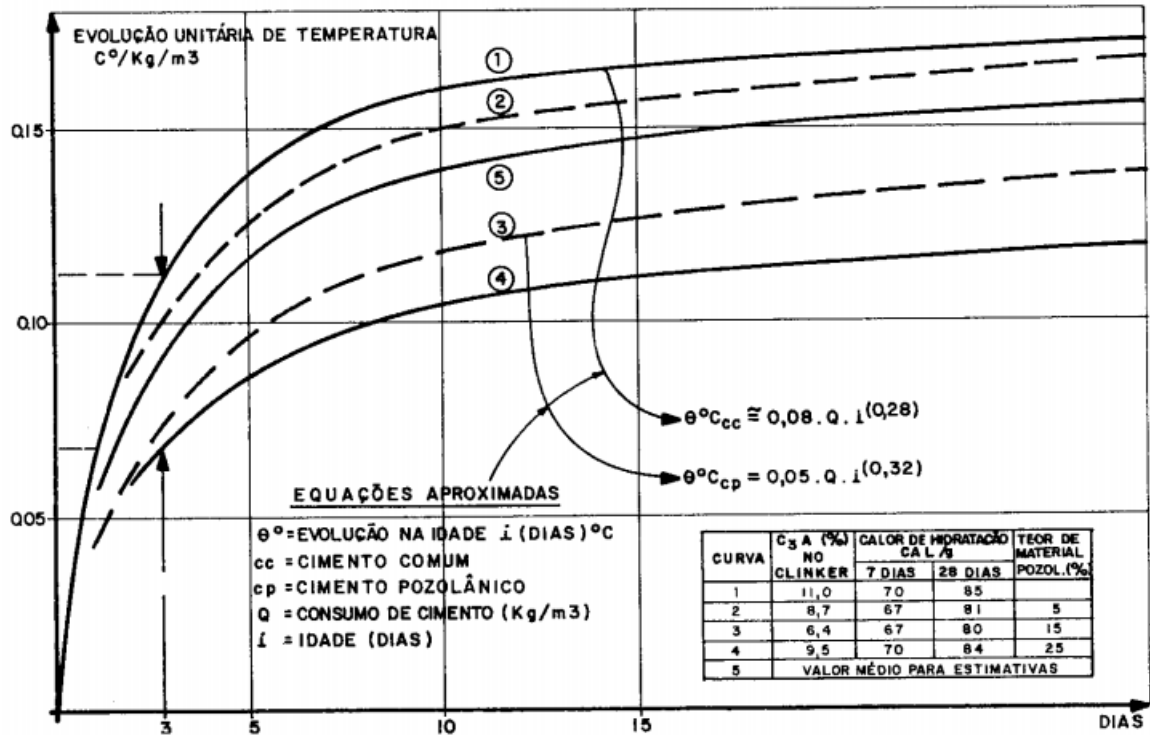
Tabela 12 – Coeficiente de elevação adiabática para diferentes consumos com o CII-Z-32

CONSUMO (kg/m³)	TEMPERATURA INICIAL (°C)	TEMPERATURA MÁXIMA (°C)	COEFICIENTE OBTIDO (°Cm³/kg)
300	26.5	47.6	0.070
400	27.5	57.1	0.074
500	26.5	60.3	0.068

Fonte: autora

Os coeficientes obtidos acima foram comparados com coeficientes da literatura (ANDRIOLO & SKWARCZYNSKI, 1988). Na Figura 27, mostram-se os valores para a evolução unitária de temperatura para concretos de cimentos com diferentes proporções de material pozolânico e, inclusive, seus valores assintóticos (máximos).

Figura 27 – Evolução unitária de temperatura para diferentes concretos



Fonte: Andriolo e Skwarczynski, 1988

A Figura 27 informa que cimentos com maior calor de hidratação apresentam o coeficiente com valor entre 0,12 e 0,15, já os cimentos com menor calor de hidratação, apresentam o coeficiente com valor entre 0,10 e 0,12. É fácil perceber a necessidade de melhora do calorímetro construído para alcançar resultados mais realistas, uma vez que os valores alcançados são inferiores aos valores esperados.

Usando as fórmulas fornecidas na mesma figura, foram determinadas as temperaturas teóricas do concreto em um sistema adiabático, estes valores são encontrados na Tabela 13.

Tabela 13 – Temperaturas teóricas e obtidas

	TEMPERATURA DE LANÇAMENTO (°C)	TEMPERATURA MÁXIMA REGISTRADA (°C)	TEMPERATURA MÁXIMA ESTIMADA (°C)	EFICIÊNCIA
CPV-ARI	29.5	59.9	68.35	88%
CPII-Z-32	27.5	57.1	66.35	86%
CPIII	27.5	47.2	52.47	90%
CPII (300)	26.5	47.6	55.64	86%
CPII (400)	27.5	57.1	66.35	86%
CPII (500)	26.5	60.3	75.07	80%

Fonte: autora

Como já é conhecida a necessidade de melhoria do calorímetro, já eram esperadas temperaturas inferiores às temperaturas teóricas.

7 CONCLUSÃO

Todos os testes aspirados foram realizados com sucesso e os principais resultados deste estudo confirmam as expectativas da literatura, já que o CPV e o concreto de maior consumo aprestaram a maior temperatura máxima, cada um em sua série de testes. O calorímetro construído obteve um comportamento satisfatório para a coleta e comparação da variação da temperatura dos concretos ao longo de tempo do experimento.

A escolha dos materiais componentes do calorímetro resultou no uso do isopor e da espuma expansiva de poliuretano, e em posse deste equipamento foi possível comparar as temperaturas de concretos com diferentes cimentos escolhidos (todos frutos de um traço padrão) e de concretos com diferentes consumos de cimento (sendo mantido o cimento escolhido). Esta comparação só foi possível a partir da moldagem de corpos de prova e a coleta e análise dos dados.

Em resumo, todos os objetivos do trabalho foram alcançados, em principal a construção do calorímetro fazendo uso de materiais de fácil acesso. É importante destacar que este equipamento é o ponto de partida para sua melhoria e construção de um equipamento com capacidades isolantes ainda mais satisfatórias.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, ACI 207.1R-96, Mass Concrete, novembro de 1996, 42 páginas.
- ANDRIOLO, F.R., SKWARCZYNSKI, T.M. **Concreto pré-refrigerado no Brasil: uma evolução com mais de 20 anos**. São Paulo, 1988.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, BT-106, Guia Básico de Utilização do Cimento Portland, dezembro de 2002, 27 páginas.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Pesquisa inédita e exclusiva revela cenário do mercado brasileiro de concreto, 2013.
Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/cms/imprensa/noticias/pesquisa-inedita-e-exclusiva-revela-cenario-do-mercado-brasileiro-de-concreto/>>. Acesso em: 13 de fevereiro de 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 5737:1992, Cimentos Portland Resistentes a Sulfatos, junho de 1992, 4 páginas.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 13116:1994, Cimento Portland de baixo calor de hidratação, março de 1994, 5 páginas.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 8809:2013, Cimento Portland - Determinação do calor de hidratação a partir do calor de dissolução - Método de ensaio, abril de 2013, 28 páginas.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 12006:1990, Cimento - Determinação do calor de hidratação pelo método de garrafa de Langavant - Método de ensaio, novembro de 1990, 12 páginas.
- BATTAGIN, A.F. Uma breve história do cimento Portland, 2002.
Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/cms/basico-sobre-cimento/historia/uma-breve-historia-do-cimento-portland/>>. Acesso em: 21 de março de 2017.
- CARLSON, R.W. A simple method for computation of temperatures in concrete. **Journal of the American Concrete Institute**. V.34, p.89-102. Nov.-Dez. 1937.
- CONCRETE TECHNOLOGY TODAY. Volume 18/Número 2, julho de 1997, Illinois.
- DA SILVA, M.D.M.C.R. Técnicas calorimétricas. **Boletim da Sociedade Portuguesa de Química**. N.53, p.63-68. Abril-junho de 1994.
- MEHTA, P.K., MONTEIRO, P.J.M. **Concrete: Microstructures, Properties, and Materials**. 4ª edição, McGraw-Hill, 2013.
- NEVILE, A.M. **Properties of Concrete**. 5ª edição, Pearson, 2013.
- YOUNG, H.D. **University Physics**, 7ª edição, Addison-Wesley Publication Co., 1987.
- SACHS, A. Tecnologia: calor sob controle. **Revista téchne**. Edição 190, novembro de 2012.