

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA,  
ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

**ESTUDO DO CALOR DE HIDRATAÇÃO DO  
CONCRETO MASSA E CONTRIBUIÇÃO AO  
CÁLCULO TÉRMICO E À PREVISÃO DE  
FISSURAS DE RETRAÇÃO**

**PATRÍCIA GUEDES GAMBALE**

D0166C17  
GOIÂNIA  
2017

---

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR  
VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES  
NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

**1. Identificação do material bibliográfico:**       **Dissertação**       **Tese**

**2. Identificação da Tese ou Dissertação:**

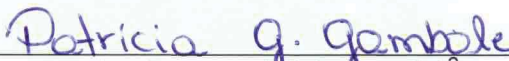
Nome completo do autor: Patrícia Guedes Gambale

Título do trabalho: Estudo do Calor de Hidratação do Concreto Massa e Contribuição ao Cálculo Térmico e à Previsão de Fissuras de Retração

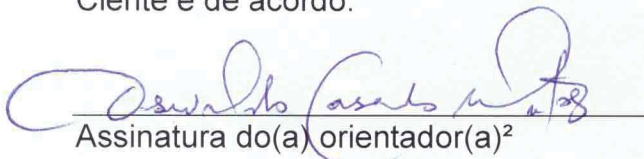
**3. Informações de acesso ao documento:**

Concorda com a liberação total do documento  **SIM**       **NÃO**<sup>1</sup>

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.

  
Assinatura do(a) autor(a)<sup>2</sup>

Ciente e de acordo:

  
Assinatura do(a) orientador(a)<sup>2</sup>

Data: 31 / 08 / 2017

---

<sup>1</sup> Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

<sup>2</sup> A assinatura deve ser escaneada.

PATRÍCIA GUEDES GAMBALE

**ESTUDO DO CALOR DE HIDRATAÇÃO DO  
CONCRETO MASSA E CONTRIBUIÇÃO AO  
CÁLCULO TÉRMICO E À PREVISÃO DE  
FISSURAS DE RETRAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Construção Civil

Orientador: Prof. Dr. Oswaldo Cascudo

D0166C17

GOIÂNIA

2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do  
Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Gambale, Patricia Guedes

Estudo do Calor de Hidratação do Concreto Massa e Contribuição ao  
Cálculo Térmico e à Previsão de Fissuras de Retração [manuscrito] /  
Patricia Guedes Gambale. - 2017.

120 f.

Orientador: Prof. Dr. Oswaldo Cascudo.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola  
de Engenharia Civil e Ambiental (EECA), Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Civil - Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Goiânia,  
2017.

1. calor de hidratação. 2. fissura térmica. 3. concreto massa. 4.  
bloco de fundação. 5. método de previsão. I. Cascudo, Oswaldo, orient.  
II. Título.

CDU 624



PPG  
GECON

Programa de Pós-Graduação em  
Geotecnia, Estruturas e Construção Civil



Ata de Nº 0166 da sessão de julgamento da  
Dissertação da aluna Patrícia Guedes Gambale  
da área de concentração Construção Civil do  
PPG em Geotecnia, Estruturas e Construção  
Civil.

Aos 31 dias do mês de agosto de 2017, às 08h30, no Auditório Biolkino Pereira da Escola de Engenharia Civil e Ambiental da UFG reuniu-se a banca examinadora designada na forma regimental pela Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil para julgar a Dissertação intitulada “**Estudo do Calor de Hidratação do Concreto Massa e Contribuição ao Cálculo Térmico e à Previsão de Fissuras de Retração**”, apresentada pela aluna **Patrícia Guedes Gambale**, como parte dos requisitos necessários à obtenção grau de MESTRE, área de concentração Construção Civil. A Banca Examinadora foi Presidida pelo Prof. Dr. Oswaldo Cascudo (GECON/UFG), tendo como membros a Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Helena Carasek (GECON/UFG) e o Prof. Dr. Selmo Kuperman (DESEK LTDA). Aberta a sessão pública, a candidata teve a oportunidade de expor o trabalho. Após a exposição, a aluna foi arguida oralmente pelos membros da Banca, os quais concluíram pelos seguintes resultados:

Membro	Instituição	Função	Resultado
Oswaldo Cascudo	GECON/UFG	Presidente	<u>APROVADO</u>
Helena Carasek	GECON/UFG	Examinadora Interna	<u>APROVADO</u>
Selmo Kuperman	(DESEK LTDA)	Examinador Externo	<u>APROVADO</u>

Tendo demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema de sua Dissertação, a Banca Examinadora concluiu pela **aprovação** da candidata **sem restrições**.

Não tendo demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema de sua Dissertação, a Banca Examinadora concluiu pela **reprovação** da candidata, conforme as seguintes justificativas:

---



---



---



---



---

Nos termos do Regulamento Geral dos Cursos de pós-graduação desta Universidade, foi lavrada a presente ata que, lida e julgada conforme, segue assinada pelos membros da **Banca Examinadora** e pela **candidata**.

\_\_\_\_\_  
Helena Carasek  
PPG-GECON/UFG

\_\_\_\_\_  
Selmo Kuperman  
DESEK LTDA

\_\_\_\_\_  
Oswaldo Cascudo  
PPG-GECON/UFG

Candidata: Patrícia Guedes Gambale

\_\_\_\_\_  
Patrícia G. Gambale

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que sempre esteve olhando por mim e me oferecendo grandes oportunidades e sei que sem Ele, eu nada seria.

A FAPEG pela bolsa concedida para a viabilidade da pesquisa.

A minha mãe, Mariângela, que sempre me proporcionou tudo de melhor, me dando apoio em todas as minhas escolhas e ao meu pai, Eduardo, que sempre me ajudou de todas as formas possíveis, me passando seu vasto conhecimento na área, me ajudando em todas as etapas da minha vida profissional. Sei que tudo o que conquistei, devo a eles.

A minha irmã, Priscilla, que sempre foi um exemplo para eu seguir e também me deu grande apoio e incentivo em todas as etapas da minha vida.

Ao meu namorado, Juan, que sempre esteve disposto a ajudar e auxiliou muito nas correções.

Ao Prof. Dr. Oswaldo Cascudo pela orientação e tanto tempo dedicado a mim, me passando um pouco de seu conhecimento para que eu possa realizar um bom trabalho.

Ao Dr. Selmo Kuperman, por prontamente se dispor a aceitar o convite para fazer parte da banca de defesa, para trazer contribuições para a pesquisa.

Aos professores do PPG-GECON, com os quais aprendi muito e tive oportunidade de fazer disciplinas que ampliaram meus conhecimentos, principalmente a Prof. Dra. Maria Carolina e Prof. Dr. Marcus André, que tive um maior contato direto e a Prof. Dra. Helena Carasek que além de me ensinar muito durante do mestrado, aceitou fazer parte da minha banca de qualificação e defesa, contribuindo de maneira expressiva para meu trabalho

Ao Prof. Dr. Daniel Araújo que esteve presente em minha qualificação e trouxe muitas contribuições para o trabalho chegar onde está.

Ao Departamento de Controle Tecnológico de Furnas, pelo auxílio no momento da concretagem dos blocos e realização de todos os ensaios necessários para a realização da pesquisa.

A Concrecon, pelo grande apoio, colocando a estrutura à disposição e o fornecimento de grande parte dos materiais utilizados na pesquisa, assim como a disponibilidade de caminhões para o transporte do concreto até o local a ser concretado. Gostaria de agradecer principalmente ao Dr. Paulo, Marcelo Reguffe, Marcus Guimarães, Simone e Marcelo Miranda, que entenderam a importância desse trabalho para mim.

A Ciplan, principalmente ao Jean Souto, que forneceu o apoio e material para a realização da pesquisa.

A Dux engenharia, pelo apoio e fornecimento de informações, juntamente com a obra, durante o monitoramento de temperatura do bloco de fundação utilizado como forma de validação do modelo proposto pela pesquisa.

A todos os meus amigos que, de formas distintas me ajudaram, estando presentes em momentos importantes da minha vida. Principalmente a Fernanda, uma grande arquiteta e amiga que me ajudou com o desenvolvimento de alguns desenhos para o trabalho.

E por final não poderia faltar o agradecimento a todos os professores que fizeram parte da minha vida e crescimento, desde o ensino fundamental, pois eu sei que todo o conhecimento que tenho hoje devo a cada um deles, que me passaram ensinamentos importantes e sem egoísmo, para me tornar o que sou hoje.

## RESUMO

O avanço das tecnologias do concreto e dos métodos de cálculo estrutural possibilita, nos dias atuais, edifícios cada vez mais desafiadores, principalmente do ponto de vista das fundações. Blocos de fundações de grandes volumes, definidos como concreto massa, carecem de atenção quanto às fissuras advindas do processo exotérmico de hidratação do concreto, esta preocupação atualmente é bastante difundida na construção de barragens e que vem ganhando espaço na construção civil urbana. Este trabalho propõe o monitoramento de protótipos de blocos de concreto desenvolvidos em laboratório e bloco de fundação em campo, com o uso de termopares comparando com métodos numéricos de elementos finitos objetivando aprimorar a previsão de fissuras e desenvolver técnicas para que estas sejam evitadas. O trabalho analisará a influência do tipo e consumo de cimento na liberação de calor e no surgimento de tensões advindas da energia liberada durante sua hidratação. Como resultados, são apresentados uma relação da interferência dos tipos e consumo de cimento por meio do monitoramento e análise dos protótipos de blocos de fundação desenvolvidos na pesquisa, o desenvolvimento de um modelo simplificado unidirecional de previsão de temperatura e tensão devido ao calor de hidratação para avaliar a temperatura máxima atingida e o potencial de fissuração no concreto massa e a comparação entre os resultados de temperatura obtidos no programa *Ansys*, que utiliza modelagem tridimensional e, como forma de validar o modelo preditivo do comportamento térmico como ferramenta confiável de análise, o trabalho também apresenta um monitoramento em campo de um bloco de fundação de uma obra localizada Goiânia e posterior aplicação do modelo de previsão e do programa *Ansys*. Verificou-se, assim, que o tipo de cimento influencia de maneira considerável na resistência à compressão e na elevação adiabática, sendo a última menos significativa. Quanto a análise de consumo de cimento, verificou-se um aumento notável de temperatura no concreto com maior consumo, ocasionando fissuras na estrutura analisada. Por meio dos resultados apresentados pelo programa *Ansys*, o monitoramento dos protótipos e bloco em campo e o modelo de previsão proposto, confirmou-se a validação do referido modelo como boa ferramenta preditiva de comportamento térmico, ressaltando algumas condições limitantes que o cercam.

**Palavras-chaves:** Calor de hidratação. Fissura térmica. Concreto massa. Bloco de fundação. Método de previsão.

## ABSTRACT

The advancement of concrete technologies and methods of structural calculation nowadays makes buildings increasingly challenging, especially from the point of view of foundations. Foundation blocks with great volumes need attention as to the fissures arising from the exothermic process of hydration of the concrete, this concern defines the mixture as mass concrete, a widespread term in the construction of dams and that has been gaining space in urban civil construction. This study proposes the monitoring of prototypes of concrete blocks developed in the laboratory and foundation block in the field, with the use of thermocouples comparing with numerical methods of finite elements aiming to improve the prediction of cracks and to develop techniques so that they are avoided. This study will analyze the influence of the type and consumption of cement in the emergence of tensions arising from the energy released during its hydration. As results, a relation of the type interference and cement consumption is presented through the monitoring and analysis of the foundation block prototypes developed in the research, the development of a simplified unidirectional model of temperature and voltage prediction due to the heat of hydration for to evaluate the maximum temperature reached and the potential of cracking in the concrete mass and the comparison between the temperature results obtained in the *Ansys* program, which uses three-dimensional modeling and, as a way of validating the predictive model of thermal behavior as a reliable tool of analysis, the study also presents a field monitoring of a foundation block of a construction located in Goiânia and later application of the forecast model and the *Ansys* program. It was found, therefore, that the cement type has a considerable influence on the compressive strength and the adiabatic elevation, the latter being less significant. As for the cement consumption analysis, there was a notable increase in temperature in the concrete with higher consumption, causing cracks in the analyzed structure. By means of the results presented by the *Ansys* program, the monitoring of the prototypes and block in the field and the proposed forecast model, the validation of this model was confirmed as a good predictive tool of thermal behavior, highlighting some limiting conditions that surround it.

**Keywords:** Heat of hydration. Thermal cracking. Mass concrete. Foundation block. Method for predicting.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	- Venda de cimento nos anos de 2009 até previsão de 2017 (SNIC, 2017)..	19
Figura 1.2	- Venda de cimento no primeiro semestre de 2016 e 2017 (SNIC, 2017)....	19
Figura 2.1	- a) Evolução da hidratação dos compostos principais do cimento Portland (ODLER, 2007); b) Evolução da formação dos compostos hidratados (ODLER, 2007)....	26
Figura 2.2	- Resultado de calorimetria isotérmica realizada durante 24 horas para 3 tipos de cimentos (BENTZ, 2010) – adaptada pela autora.....	27
Figura 2.3	- Calor de Hidratação de tipos distintos de cimento (ABCP, 2012).....	28
Figura 2.4	- Calor de Hidratação de cimentos com as mesmas características, porém produzidos em fábricas distintas (ABCP, 2005).....	29
Figura 2.5	- Desenvolvimento de temperatura em concretos com diferentes consumos de cimento (GADJA; ALSAMSAM, 2006).....	30
Figura 2.6	- Evolução do calor de hidratação do cimento e das suas combinações com adições (SANTOS, 2011).....	31
Figura 2.7	- Efeito da substituição parcial de cimento por cinza volante no concreto (FURNAS, 1997).....	32
Figura 2.8	- Taxa de calor liberado por misturas de cimento, sílica ativa e superplastificante (adaptado pelo autor - PINTO, 1997).....	33
Figura 2.9	- Construção de um quebra-mar – colocação de tetrápodes (AZENHA, 2004).....	34
Figura 2.10	- Geometria da seção (AZENHA <i>et al.</i> , 2011).....	35
Figura 2.11	- Resultados obtidos por Azenha <i>et al.</i> (2011) para o tetrápodo.....	35
Figura 2.12	- Geometria da viga estudada (FURNAS, 1997).....	36
Figura 2.13	- (a) Áreas estudadas e (b) malha utilizada na análise da viga (FURNAS, 1997).	36
Figura 2.14	- Isotermas de temperatura para concretagem de camadas - intervalo de 7 dias (KRÜGER, 2001).....	38
Figura 2.15	- a) Variação da temperatura do concreto para diferentes espessuras do concreto (modificado pela autora - CHOKTAWEEKARN; TANGTERMSIRIKUL, 2010	

b) Curva da temperatura máxima do concreto em relação a espessura (modificado pela autora - CHOKTAWEEKARN; TANGTERMSIRIKUL, 2010).....	39
Figura 2.16 - Variação da temperatura em relação do tempo para diferentes posições no concreto em um muro de arrimo (SOUZA, 2016; AZENHA, 2004; LURA E BREUGEL, 2001).....	40
Figura 2.17 - Coeficientes mínimo e máximo de expansão térmica de agregados de diversas litologias (ACI, 2007; BAMFORTH <i>et al.</i> , 2007; FURNAS, 1997). (a) Coeficientes mínimos; (b) Coeficientes máximos.....	41
Figura 2.18 - Coeficientes mínimo e máximo de expansão térmica de concretos com agregados de diversas litologias (BAMFORTH <i>et al.</i> , 2007; FURNAS, 1997). (a) Coeficientes mínimos; (b) Coeficiente máximos.....	42
Figura 2.19 - Variação de temperatura no concreto (WENDLER; TURRA; SERIGHELI JÚNIOR, 2007).....	44
Figura 2.20 - Grau de restrição de tração na seção central. (MEHTA; MONTEIRO, 2014).....	46
Figura 2.21 - Fissuras observadas em bloco de fundação decorrentes do calor de hidratação (CASCUDO, 2014).....	47
Figura 2.22 - Etringita ou trissulfoaluminato de cálcio hidratado em argamassa (HASPARYK, 2005).....	49
Figura 2.23 - Enfoque holístico de Collepardi para expansão e fissuração por formação de etringita tardia. (MEHTA; MONTEIRO, 2014).....	49
Figura 2.24 - (a) Ensaio de tração por compressão diametral; (b) Ensaio de tração na Flexão; (c) Ensaio de tração direta.....	52
Figura 2.25 - Malha de Elementos Finitos para problema plano (SOUZA, 2003).....	57
Figura 2.26 - Solução em Elementos Finitos (COELHO, 2012).....	59
Figura 2.27 - Propagação de calor em fluxo unidirecional.....	60
Figura 2.28 - Diagrama de prismas elementares mostrando a nomenclatura utilizada por Carlson (FURNAS, 1997).....	61
Figura 2.29 - Aplicação prática do processo de Galerkin para uma propagação unidimensional de temperatura em uma estrutura de espessura L (LEWIS <i>et al.</i> , 1996).....	64
Figura 2.30 - Fluxograma do algoritmo para resolução numérica da equação de	

Fourier.....	68
Figura 3.1 - Fluxograma das variáveis estudadas.....	70
Figura 3.2 - Levantamentos do volume de concreto para blocos de fundação de obras em Goiânia.....	70
Figura 3.3 - Fluxograma dos ensaios de caracterização realizados dos materiais empregados na pesquisa.....	72
Figura 3.4 - (a) Ensaio de calor de hidratação pela Garrafa de Langavant. (b) Ensaio de calorimetria.....	74
Figura 3.5 - Desenvolvimento de temperatura apresentado pelo calorímetro, para cada tipo de cimento.....	75
Figura 3.6 - Ensaio de pozolanicidade do cimento CP IV.....	76
Figura 3.7 - Agregados graúdos empregados no concreto da pesquisa.....	76
Figura 3.8 - Curvas de Distribuição Granulométrica dos agregados graúdos empregados (Brita 0 e Brita 1).....	77
Figura 3.9 - Agregados miúdos empregados no concreto da pesquisa.....	78
Figura 3.10 - Curvas de Distribuição Granulométrica dos agregados miúdos empregados (Areia Natural e Areia Artificial).....	78
Figura 3.11 - Aditivo polifuncional empregado no concreto da pesquisa.....	79
Figura 3.12 - Fotos do estudo de dosagem sendo realizado.....	80
Figura 3.13 - Fluxograma dos parâm. de dosagem e variáveis estudadas na pesquisa....	82
Figura 3.14 - Aparelhagem do ensaio de difusividade térmica realizado na pesquisa....	83
Figura 3.15 - Gráfico gerado pelo ensaio de difusividade.....	83
Figura 3.16 - Calorímetro adiabático – Ante – sala – Corte Longitudinal (FURNAS, 1997).....	84
Figura 3.17 - (a) Vista geral da ante-sala. (b) Corpo de prova dentro do calorímetro....	84
Figura 3.18 - Fluxograma dos ensaios e parâm. dos concretos analisados na pesquisa...	85
Figura 3.19 - (a) Representação do protótipo de bloco usado para a realização do estudo. (b) Modelo original do bloco concretado na pesquisa.....	86
Figura 3.20 - As três torres do empreendimento, com destaque para a Torre A, objeto de análise.....	87
Figura 3.21 - (a) Foto do início da concretagem do bloco; (b) Foto do final da concretagem.....	87

Figura 3.22	- Projeção e planta com dimensões do bloco analisado.....	88
Figura 3.23	- Localização dos termopares utilizados para o monitoramento da Temperatura dos blocos. (a) Vista superior. (b) Corte.....	89
Figura 3.24	- Monitoramento de temperatura. (a) Aparelho utilizado nas leituras das temperaturas dos blocos. b) Estação para coleta de temperaturas ambientes.....	90
Figura 3.25	- Termopar instalado no bloco de fundação da obra monitorada.....	90
Figura 3.26	- Interface do modelo de previsão.....	91
Figura 3.27	- Interface geral do <i>software Ansys</i> .....	93
Figura 3.28	- Interface da seção <i>Mechanical</i> do <i>software Ansys</i> .....	94
Figura 3.29	- Malha de elementos finitos usada no programa <i>Ansys</i> para a simulação térmica do protótipo de bloco.....	95
Figura 3.30	- Malha de elementos finitos gerado pelo <i>Ansys</i> para simulação térmica do bloco de fundação monitorado em obra.....	95
Figura 4.1	- Resultados de elevação adiabática por 24 horas.....	98
Figura 4.2	- Resultados de elevação adiabática por 28 dias.....	98
Figura 4.3	- Resultados de temperaturas do concreto com 350 kg/m <sup>3</sup> cimento CP II F-40 e ambiente.....	99
Figura 4.4	- Resultados de temperaturas do concreto com 350 kg/m <sup>3</sup> cimento CP IV e ambiente.....	99
Figura 4.5	- Resultados de temperaturas do concreto com 350 kg/m <sup>3</sup> cimento CP V- ARI e ambiente.....	100
Figura 4.6	- Resultados de temperaturas do concreto com 500 kg/m <sup>3</sup> cimento CP V- ARI e ambiente.....	100
Figura 4.7	- Resultados de temperaturas no centro do bloco com 350 kg/m <sup>3</sup> de cada tipo de cimento.....	102
Figura 4.8	- Resultados de temperaturas no centro do bloco com 350 kg/m <sup>3</sup> e 500 kg/m <sup>3</sup> de cimento CP V-ARI.....	102
Figura 4.9	- Temperatura máxima atingida na simulação do bloco com cimento CP II F-40 e consumo 350 kg/m <sup>3</sup> pelo programa <i>Ansys</i> .....	103
Figura 4.10	- Temperatura máxima atingida na simulação do bloco com cimento CP V ARI e consumo 350 kg/m <sup>3</sup> pelo programa <i>Ansys</i> .....	104
Figura 4.11	- Temperatura máxima atingida na simulação do bloco com cimento	

CP IV e consumo 350 kg/m <sup>3</sup> pelo programa <i>Ansys</i> .....	104
Figura 4.12 - Comparação entre <i>Ansys</i> , modelo e campo do bloco com cimento CP II e consumo 350 kg/m <sup>3</sup> .....	104
Figura 4.13 - Comparação entre <i>Ansys</i> , modelo e campo do bloco com cimento CP V-ARI e consumo 350 kg/m <sup>3</sup> .....	105
Figura 4.14 - Comparação entre <i>Ansys</i> , modelo e campo do bloco com cimento CP IV e consumo 350 kg/m <sup>3</sup> .....	105
Figura 4.15 - Temperatura máxima apresentada na simulação do bloco com cimento CP V-ARI e consumo 500 kg/m <sup>3</sup> pelo programa <i>Ansys</i> .....	106
Figura 4.16 - Comparação entre <i>Ansys</i> , modelo e campo do bloco com cimento CP V-ARI e consumo 350 kg/m <sup>3</sup> .....	107
Figura 4.17 - Bloco concretado com CP V-ARI e consumo de 500 kg/m <sup>3</sup> . (a) Fissura no bloco; (b) Corpo de prova extraído do bloco.....	108
Figura 4.18 - a) Resultado no modelo de previsão para o bloco com CP II F 40 e consumo de cimento de 350 kg/m <sup>3</sup> ; b) Gráfico de tensão contra o tempo.....	108
Figura 4.19 - a) Resultado no modelo de previsão para o bloco com CP IV e consumo de cimento de 350 kg/m <sup>3</sup> ; b) Gráfico de tensão contra o tempo.....	109
Figura 4.20 - a) Resultado no modelo de previsão para o bloco com CP V-ARI e consumo de cimento de 350 kg/m <sup>3</sup> ; b) Gráfico de tensão contra o tempo.....	109
Figura 4.21 - a) Resultado no modelo de previsão para o bloco com CP V-ARI e consumo de cimento de 500 kg/m <sup>3</sup> ; b) Gráfico de tensão contra o tempo.....	109
Figura 4.22 - Gráfico comparativo entre medição em campo e as previsões oriundas dos modelos considerados.....	111
Figura 4.23 - a) Resultado de probabilidade de aparecimento de fissuras pelo modelo de previsão. b) Gráfico de Tensão.....	112

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	- Composição do clínquer (AZENHA, 2004).....	26
Tabela 2.2	- Prescrições normativas de calor de hidratação para cimento Portland (ABCP, 2012).....	28
Tabela 2.3	- Temperatura máxima para a viga (COELHO, 2012; KRÜGER, 2001).....	37
Tabela 2.4	- Multiplicadores da tensão para a rigidez da fundação em relação ao concreto lançado (ACI, 1978).....	47
Tabela 2.5	- Correlações entre Resistência à Tração e a Resistência à compressão (FURNAS, 1997)	53
Tabela 3.1	- Caracterização física e mecânica dos cimentos empregados na pesquisa.....	72
Tabela 3.2	- Caracterização química dos cimentos empregados na pesquisa.....	73
Tabela 3.3	- Composição química e resultados de calor de hidratação dos cimentos empregados na pesquisa.....	75
Tabela 3.4	- Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados graúdos utilizados na pesquisa.....	77
Tabela 3.5	- Ensaios de caracterização dos agregados miúdos utilizados no programa experimental.....	78
Tabela 3.6	- Características do aditivo polifuncional empregado no concreto da pesquisa.....	79
Tabela 3.7	- Traços desenvolvidos no estudo de dosagem.....	80
Tabela 3.8	- Traços rodados em Central dosadora de Concreto para concretagem dos blocos.....	81
Tabela 3.9	- Propriedades térmicas do concreto utilizado para concretagem dos blocos..	82
Tabela 3.10	- Traço de concreto utilizado para a concretagem do bloco.....	89
Tabela 4.1	- Temperaturas máximas medidas em cada monitoramento de temperatura...	101
Tabela 4.2	- Temperaturas máximas encontradas no <i>Ansys</i> , modelo da pesquisa, campo	105
Tabela 4.3	- Temperaturas apresentadas em campo e no modelo de previsão.....	111

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABCP	- Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	- <i>American Concrete Institute</i>
ANAMACO	- Associação Nacional dos Comerciantes de Materiais de Construção
ASTM	- <i>American Society for Testing and Materials</i>
C <sub>2</sub> S	- Silicato Bicálcico
C <sub>3</sub> A	- Aluminato Tricálcico
C <sub>3</sub> S	- Silicato Tricálcico
C <sub>4</sub> AF	- Aluminoferrato Tetracálcico
CH	- Hidróxido de cálcio
CP II E - 32	- Cimento Portland Composto de Escória, classe de resistência 32 MPa
CP II F - 32	- Cimento Portland Composto de Fíler, classe de resistência 32 MPa
CP II F - 40	- Cimento Portland Composto de Fíler, classe de resistência 40 MPa
CP II Z - 32	- Cimento Portland Composto de Pozolana, classe de resistência 32 MPa
CP III - 32	- Cimento Portland de Alto Forno, classe de resistência 32 MPa
CP III - 40	- Cimento Portland de Alto Forno, classe de resistência 40 MPa
CP IV - 32	- Cimento Portland Portland, classe de resistência 32 MPa
CP V - ARI	- Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
C-S-H	- Silicato de Cálcio Hidratado
DEF	- <i>Delayed Ettringite Formation</i>
DNER	- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
EM	- Norma Européia
HPC	- High Performance Concrete
MDF	- Método das Diferenças Finitas
NBR	- Norma Brasileira Registrada
MEC	- Método dos Elementos de Contorno
MEF	- Método dos Elementos Finitos
MEV	- Microscópio eletrônico de varredura

UHE                    - Usina Hidrelétrica  
SNIC                   - Sindicato Nacional da Indústria do Cimento

# SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO.....</b>	<b>18</b>
<b>1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>18</b>
<b>1.2. OBJETIVOS.....</b>	<b>22</b>
<b>1.3. ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO.....</b>	<b>22</b>
<b>CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>24</b>
<b>2.1. HIDRATAÇÃO DO CIMENTO.....</b>	<b>24</b>
<b>2.1.1. Fatores que interferem no calor de hidratação do cimento.....</b>	<b>25</b>
2.1.1.1. Tipo de cimento.....	25
2.1.1.2. Consumo de cimento.....	29
2.1.1.3. Aspectos geométricos e dimensionais.....	33
2.1.1.4. Tipo e consumo de agregados.....	40
<b>2.2. MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS DE ORIGEM TÉRMICA POR CALOR HIDRATAÇÃO.....</b>	<b>42</b>
<b>2.2.1. Fissuras por retração.....</b>	<b>42</b>
<b>2.2.2. Formação tardia da Etringita.....</b>	<b>48</b>
<b>2.3. PROPRIEDADES DO CONCRETO.....</b>	<b>50</b>
<b>2.3.1. Propriedades físicas e mecânicas.....</b>	<b>51</b>
<b>2.3.2. Propriedades térmicas.....</b>	<b>53</b>
<b>2.4. MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE TEMPERATURA E TENSÕES.....</b>	<b>55</b>
<b>2.4.1. Método de Schmidt.....</b>	<b>56</b>
<b>2.4.2. Método de Carlson.....</b>	<b>56</b>
<b>2.4.3. Método dos Elementos Finitos.....</b>	<b>56</b>
<b>2.5. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA PARA MODELO DE PREVISÃO.....</b>	<b>59</b>
<b>CAPÍTULO 3: METODOLOGIA DO TRABALHO.....</b>	<b>69</b>
<b>3.1. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>69</b>
<b>3.1.1. Variáveis estudadas e condições fixas da pesquisa.....</b>	<b>70</b>
3.1.1.1. Tipo de cimento.....	71

3.1.1.2. Consumo de cimento.....	71
<b>3.1.2. Materiais empregados.....</b>	<b>71</b>
3.1.2.1. Aglomerantes.....	72
3.1.2.2. Agregados.....	76
3.1.2.3. Aditivo.....	79
3.1.2.4. Concreto.....	79
<b>3.1.3. Método.....</b>	<b>86</b>
3.1.3.1. Protótipo e bloco de fundação de obra em Goiânia.....	86
3.1.3.2. Monitoramento de temperatura no protótipo e no bloco em campo.....	89
3.1.3.3. Modelo de previsão de temperatura e tensão.....	90
3.1.3.3. Programa <i>Ansys</i> .....	93
<b>CAPÍTULO 4: RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>98</b>
<b>4.1. CONCRETAGEM DOS BLOCOS.....</b>	<b>98</b>
4.1.1. Ensaio de Adiabáticas.....	98
4.1.2. Monitoramento de temperatura nos protótipos de blocos.....	99
4.1.3. Análise dos resultados.....	100
<b>4.2. SIMULAÇÃO DE TEMPERATURA PELO ANSYS E MODELO DE PREVISÃO.....</b>	<b>103</b>
4.2.1. Análise dos resultados com cimentos distintos.....	103
4.2.2. Análise dos resultados com consumos distintos.....	106
<b>4.3. SIMULAÇÃO DE TENSÃO PELO MODELO DE PREVISÃO.....</b>	<b>107</b>
<b>4.4. VALIDAÇÃO DO MODELO EM CAMPO.....</b>	<b>110</b>
4.4.1. Resultados.....	110
<b>CAPÍTULO 5: CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>113</b>
<b>5.1. CONCLUSÕES.....</b>	<b>113</b>
5.1.1. Tipo e consumo de cimento.....	113
5.1.2. Modelo de Previsão x <i>Ansys</i> .....	114
<b>5.2. SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....</b>	<b>115</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>116</b>

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

No presente capítulo é apresentada uma contextualização do tema abordado no trabalho, a justificativa da importância, a questão de pesquisa e a hipótese referente ao trabalho, os objetivos geral e específicos, a estruturação do trabalho e as delimitações da pesquisa.

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA

O concreto é um material construtivo amplamente empregado no mundo, é parte integrante de praticamente todas as construções, de edificações residenciais a grandes obras de infraestrutura. Em um estudo, coordenado pela e8 Inteligência UBM Brazil em parceria com a ABCP, foram coletados dados do período entre 2005 e 2012 para projetar tendências do setor nos próximos anos e por meio dessa pesquisa chegou-se à conclusão que o aumento do concreto produzido em centrais foi de 180%, no período estudado, estimando-se uma produção de 51 milhões de m<sup>3</sup> de concreto no ano de 2013 (ABCP, 2013).

A tendência apresentada desde de 2014 é de queda, observada inicialmente no mercado cimentício, que segundo estudo realizado pelo Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC) que apresentou uma queda de 23% desde 2014 até Junho de 2017, o que é resultado da diminuição de demanda por parte das centrais dosadoras de concreto.

Um levantamento considerando a venda de cimento nos últimos anos (Figura 1.1) e um comparativo entre os meses do primeiro semestre dos anos de 2016 e 2017 (Figura 1.2) foi realizado pelo SNIC e está apresentado a seguir. É possível observar, na Figura 1.1, a queda nas vendas a partir do ano de 2014, sendo os anos de 2015 e 2016 muito ruins para o setor, afetados, sobretudo, pela falta de crédito ao consumidor e pelos problemas econômicos enfrentados pelo Brasil nesse período.

Figura 1.1 – Venda de cimento nos anos de 2009 até previsão de 2017 (SNIC, 2017).

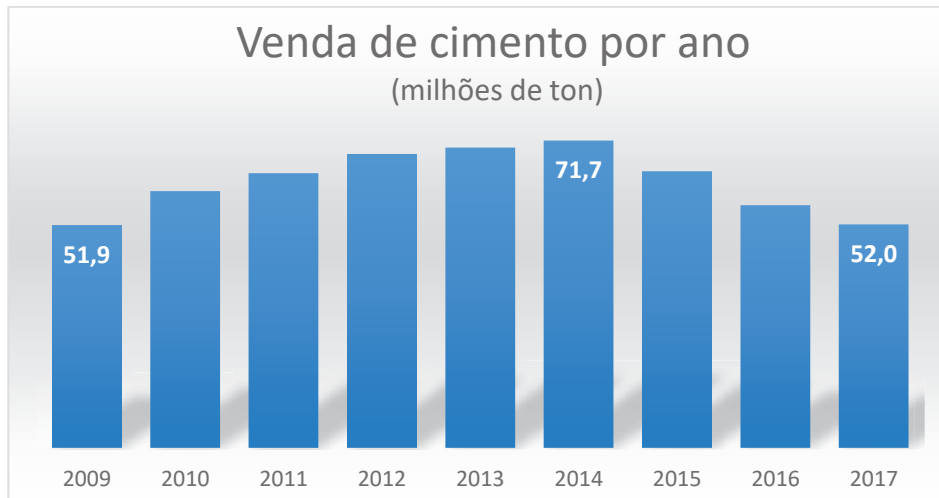
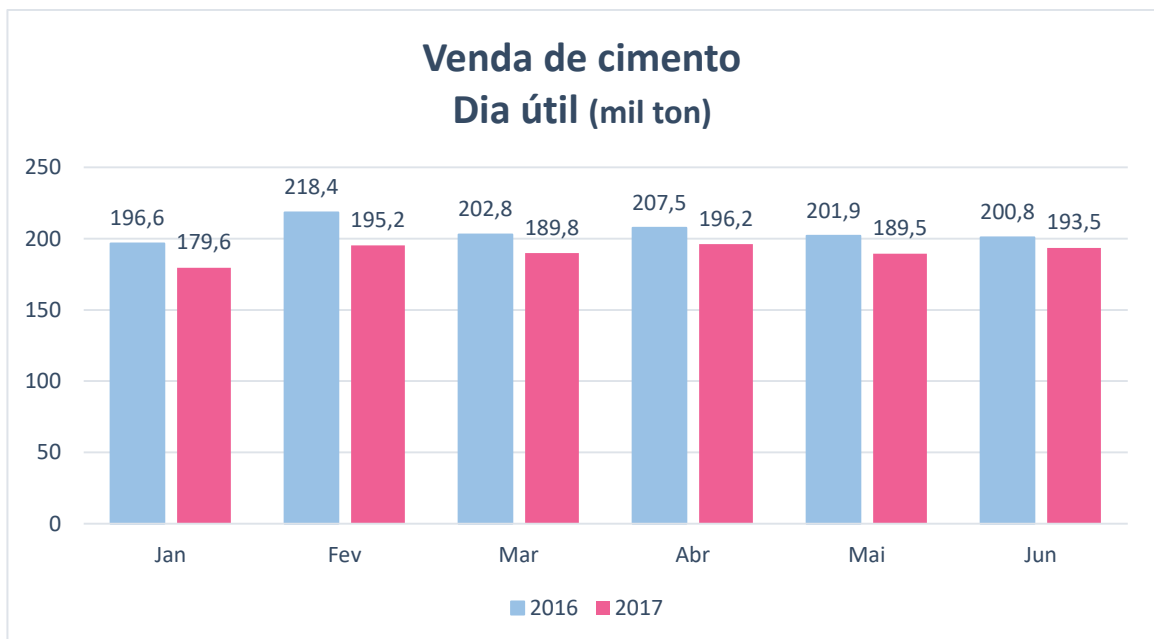


Figura 1.2 – Venda de cimento no primeiro semestre de 2016 e 2017 (SNIC, 2017).



A previsão, segundo o SNIC e a Associação Nacional dos Comerciantes de Materiais de Construção (ANAMACO), é de melhoria nos próximos seis meses para o setor da construção civil, que atualmente é caracterizado por um grande número de obras verticais, com projetos sempre mais sofisticados, alturas que batem recordes todos os anos, estruturas cada vez mais esbeltas e uma busca cada vez maior de se atingir um alto desempenho das estruturas de concreto. Esse quadro resulta em cargas cada vez mais elevadas aplicadas às fundações que, por este motivo, precisam ser maiores e/ou mais profundas, além de apresentarem uma

resistência característica do concreto muito superior às resistências atingidas em períodos anteriores, resultante de elementos maiores e mais robustos. O volume de concreto, conseqüentemente, aumenta, caracterizando-se como uma estrutura de concreto massa.

O concreto massa é, geralmente, qualquer estrutura de concreto com uma seção maior ou igual a um metro, em que o calor liberado pela hidratação do cimento é mais concentrado, por isso as temperaturas internas aumentam mais rápido, apresentando uma diferença de temperatura grande entre o interior e exterior, o que pode provocar fissuras afetando a segurança estrutural e o uso normal do elemento e, por esse motivo, ao ser aplicado numa estrutura, requer a tomada de precauções que evitem fissurações derivadas de seu comportamento térmico requer (ACI, 2011; LI, NIE, WANG, 2014). Com base nessas definições, surge a importância da investigação do fenômeno não só em estruturas de grande porte, como barragens, por exemplo, mas também em estruturas urbanas como os blocos de transição (nas fundações de edifícios) e em elementos estruturais de pontes, entre outros.

O fenômeno da hidratação do cimento Portland tem sido intensamente pesquisado nos últimos anos. Ele decorre de reações de superfície entre a água e o grão de cimento, que envolvem mecanismos de dissolução-precipitação ou reações topoquímicas (hidratação no estado sólido), de natureza exotérmica (MEHTA; MONTEIRO, 2008; TAYLOR, 1997). Essas reações químicas, então, liberam calor, podendo dar origem a elevações consideráveis de temperatura, não só em estruturas cujo concreto tem características massivas, mas em qualquer tipo de estrutura, notadamente em função do perfil dos concretos atuais, que contêm elevados consumos de cimento, resistências características cada vez mais altas, dimensões suficientemente grandes, restritas condições de dissipação de calor e com restrições à movimentação. Soma-se a isso o fato de se empregarem, em volume cada vez maior, os chamados concretos especiais, que por concepção utilizam consumos de cimento maiores em suas formulações, como o concreto auto-adensável e o concreto de altas resistências (CARVALHO, 2002). Em tais casos, o comportamento acoplado termo-químico-mecânico da estrutura é determinante em seu projeto.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), o conhecimento da quantidade de calor liberado é importante, porque o calor é algumas vezes favorável e outras vezes desfavorável. O concreto gera calor após o início da hidratação do cimento e, nas primeiras idades, apresenta um módulo de elasticidade baixo e há o início de ganho de resistência, momento em que ele está

umentando a temperatura. Aparecem, então, na estrutura, tensões de compressão que não acarretam fissuras, mas a partir do momento em que a temperatura máxima na estrutura tende a entrar em equilíbrio térmico com a temperatura ambiente, as tensões de compressão instaladas na estrutura começarão a diminuir até que se revertem em tensões de tração no material. O concreto, que resiste pouco à tração, passará a apresentar os problemas de fissuração a partir deste momento, desde que as tensões de tração sejam maiores que a tensão admissível do concreto à tração, que caracteriza sua capacidade resistente à tração.

Inúmeras pesquisas têm sido realizadas de modo a entender a natureza da fissuração no concreto nas primeiras idades e propor medidas de prevenção. No entanto, em função da complexidade da natureza do problema, que envolve fenômenos químicos, térmicos e mecânicos, alguns aspectos da fissuração do concreto nas primeiras idades ainda não são completamente compreendidos. Acrescente-se a tal complexidade os recentes avanços dos processos construtivos, além de novas concepções de cimentos e dosagens, que influem diretamente na fissuração do concreto de pouca idade.

As fissuras podem reduzir a capacidade de resistência da peça estrutural afetada e, ainda, tendem a diminuir a durabilidade do concreto, já que permitem a entrada de agentes agressivos com mais rapidez e facilidade. No caso dos blocos de transição, têm-se elementos estruturais de grande importância, uma vez que eles dão suporte a toda a edificação e são responsáveis por transmitir as cargas das edificações para os elementos de fundação profunda. Dessa forma, ocorrências como fissuras podem acarretar sérios problemas de ordem estrutural, afetando a segurança da estrutura e a estabilidade do edifício. Por sua vez, a recuperação dessa estrutura de extrema importância é de grande dificuldade, justificando a relevância das ações preventivas desses problemas.

Diante desse contexto atual, a relevância deste trabalho está no desenvolvimento de estudo comparativo entre traços de concreto com diferentes tipos e consumos de cimento, visando observar a influência destes fatores no aumento de temperatura devido ao calor gerado pela hidratação do cimento, propondo, assim, meios preditivos (modelos) para a elevação de temperatura no concreto, bem como um modelo de previsão de fissuras decorrentes desse mecanismo térmico. Outros estudos nesse tema já foram realizados, porém com foco em outros aspectos. O foco deste trabalho se apoia no desenvolvimento de um método que poderá

ser aplicado em obras urbanas, com a aplicação de concreto de características massivas, visando evitar problemas de fissuras térmicas que possam vir a acontecer na estrutura.

## 1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral o desenvolvimento e a proposição de um modelo unidimensional de previsão de temperatura e tensão advindas do calor de hidratação, de modo a avaliar o potencial de fissuração em concreto massa, mais especificamente em blocos de fundação de grandes volumes de concreto, representativos de obras urbanas.

Como objetivos específicos têm-se:

- Verificar a influência do tipo de cimento no comportamento térmico em concreto de características massivas;
- Verificar a influência do consumo de cimento utilizado no desenvolvimento do calor no interior da peça concretada;
- Comparar os resultados de temperatura obtidas por meio do monitoramento do concreto, no modelo unidimensional proposto e no modelo tridimensional do programa *Ansys*;
- Avaliar o modelo preditivo do comportamento térmico a partir de monitoramento de bloco de fundação em obra urbana, no sentido de validá-lo como ferramenta confiável de análise.

## 1.3 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO

No primeiro capítulo é feita uma introdução geral sobre o tema abordado no trabalho, situando o leitor quanto ao contexto, justificativa da importância, os objetivos geral e específicos, a estruturação do trabalho e as delimitações da pesquisa.

No segundo capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica de trabalhos apresentados por diversos autores sobre os fatores que interferem em fissuras por motivos térmicos e sobre métodos de previsão de fissuras e modelagem.

No terceiro capítulo é detalhada a metodologia e os materiais utilizados para a realização da pesquisa, com as respectivas caracterizações, ensaios que foram realizados e a forma de desenvolvimento do modelo de previsão de temperatura e tensão proposto pela pesquisa, assim como os parâmetros utilizados no programa *Ansys*, que foi usado como método comparativo com o modelo de previsão proposto.

No quarto capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos com o monitoramento de temperatura e aparecimento de fissuras dos blocos concretados, e também a comparação entre os resultados apresentados pelo método de previsão proposto pela pesquisa, o programa *Ansys* e as medições em campo.

No quinto capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

Finalizando, o sexto capítulo apresenta as referências bibliográficas usadas como embasamento da pesquisa.

## **CAPÍTULO 2**

### **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Este capítulo reúne uma revisão de trabalhos apresentados por autores diversos quanto aos fatores que interferem no calor de hidratação do concreto, as patologias causadas e os métodos de avaliação de temperatura e tensões.

#### **2.1 HIDRATAÇÃO DO CIMENTO**

O processo de endurecimento e, conseqüente, ganho de resistência do Cimento Portland se dá pela hidratação dos compostos anidros, ou seja, mistura de seus compostos com a água. A hidratação do cimento Portland pode ser analisada de acordo com Carvalho (2002) como a soma das reações dos vários compostos individuais do cimento Portland com a água, que ocorrem simultaneamente. Mehta e Monteiro (2008) explicam que, em presença de água, os silicatos e aluminatos formam produtos de hidratação, que com o decorrer do tempo começam a formar uma rede microestrutural coesiva, se desenvolvendo com o aumento do número de hidratos, dando origem a uma massa firme e dura, que constitui a pasta de cimento endurecida.

O significado do calor de hidratação do cimento em tecnologia do concreto é diversificado. O calor de hidratação pode muitas vezes ser um problema, por exemplo, em estruturas de concreto massa, e outras vezes um auxílio, como em concretagem durante o inverno quando a temperatura ambiente pode ser muito baixa para fornecer energia de ativação para as reações de hidratação (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Nas primeiras horas, a hidratação do cimento ocorre pelo mecanismo de dissolução-precipitação, pela dissolução gradual das fases anidras do clínquer e da gipsita, supersaturação da solução e precipitação dos hidratos sobre as partículas (BAROGHEL-BOUNY, 1994). Neste período, a taxa de reação se mantém crescente, representando o período de aceleração do calor de hidratação. Com o desenvolvimento da hidratação, o cimento anidro é gradativamente recoberto pela precipitação específica do silicato de cálcio hidratado (C-S-H),

que forma uma fina camada sobre as partículas, restringindo a dissolução das fases anidras (TAYLOR, 1997).

Após a consolidação da pasta atua um segundo mecanismo, denominado topoquímico ou hidratação no estado sólido, em que as reações ocorrem diretamente na superfície dos componentes do cimento anidro sem entrarem em reação (MEHTA; MONTEIRO, 2008). O recobrimento total do cimento anidro representa o início da hidratação topoquímica (KADRI; DURVAL, 2002).

Estas reações de hidratação são acompanhadas da liberação de energia térmica evidenciando o caráter exotérmico das reações. Aurich (2008) considera que a capacidade de liberação de calor é a propriedade mais importante que se deve levar em conta durante o processo de hidratação do cimento e Azenha (2004) explica que com grande liberação de calor, ocorre uma expansão volumétrica a que depois se seguirá uma contração, que na presença de restrições externas ou internas, pode provocar a fissuração do concreto, justificando a importância da caracterização física e química dos materiais e a compreensão das reações envolvidas no processo de hidratação para que seja possível a utilização de modelos de previsão que apoiem a tomada de decisões em relação à mistura de concreto a utilizar em cada situação, tendo em vista minimizar o risco de fissuração deste material.

A velocidade de hidratação, a velocidade de liberação de calor e a quantidade total de calor gerado dependem basicamente do tipo e quantidade de cimento utilizado e da temperatura ambiente inicial de lançamento, porém podem estar relacionados também com os aspectos geométricos e dimensionais da peça que será concretada e ainda o tipo e consumo de agregado utilizado para a fabricação do concreto.

## **2.1.1. Fatores que interferem no calor de hidratação do cimento**

### **2.1.1.1. Tipo de cimento**

O cimento Portland é obtido a partir da mistura de calcário e argila através de processos específicos, com possível adição de outras matérias-primas.

Inicialmente é composto essencialmente pelos seguintes óxidos, ordenados em função da respectiva quantidade: óxido de cálcio (CaO), óxido de silício (SiO<sub>2</sub>), óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). A partir destas matérias-primas, e através de processos de queima, fusão parcial, aglomeração e perda de calor, obtém-se o clínquer, cujos componentes principais se encontram discriminados na Tabela 2.1.

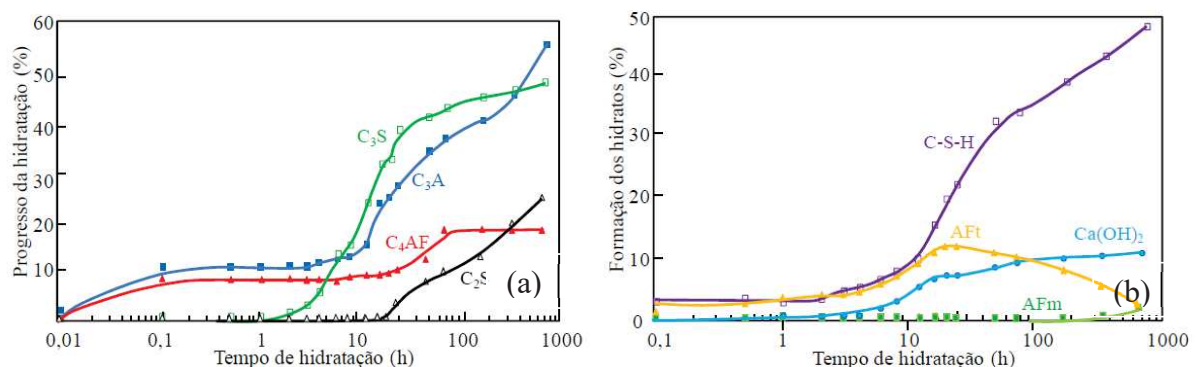
Tabela 2.1 – Composição do clínquer (AZENHA, 2004)

Composto	Composição	Porcentagem de ocorrência (em massa)
Silicato tricálcico (C <sub>3</sub> S)	3CaO SiO <sub>2</sub>	20% a 65%
Silicato bicálcico (C <sub>2</sub> S)	2CaO SiO <sub>2</sub>	10% a 55%
Aluminato tricálcico (C <sub>3</sub> A)	3CaO Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0% a 15%
Aluminoferrato tetracálcico (C <sub>4</sub> AF)	4CaO Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5% a 15%

Na Figura 2.1(a) observa-se um progresso da hidratação nos compostos C<sub>3</sub>A, responsável pelo enrijecimento (perda de consistência) e a pega (solidificação) do cimento Portland, e C<sub>3</sub>S, que tem um importante papel na determinação das características de endurecimento, ou seja, na taxa de desenvolvimento da resistência (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

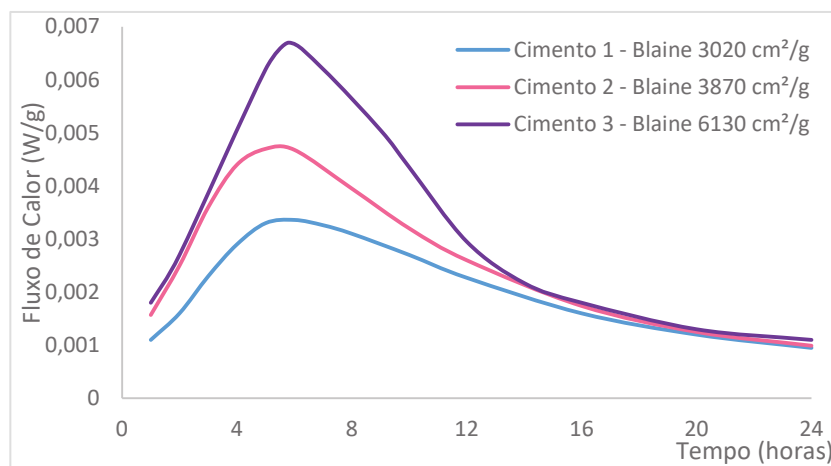
Embora a evolução da hidratação dependa, de modo geral, da solubilidade e reatividade das fases e da finura, o primeiro pico de liberação de calor ocorre nos primeiros minutos, e como pode ser visto na Figura 2.1(b), o pico principal de formação do C-S-H ao redor de 10 horas, o de formação da etringita em seguida e o do monossulfoaluminato entre 20 e 30 horas. (ODLER, 2007).

Figura 2.1 – (a) Evolução da hidratação dos compostos principais do cimento Portland (ODLER, 2007);  
(b) Evolução da formação dos compostos hidratados (ODLER, 2007).



Essa característica exotérmica isolada de cada composto evidencia a variação de calor liberado por cada tipo de cimento que apresenta em sua composição quantidades distintas desses compostos. De acordo com Neville (1997) e Bentz (2010), os compostos presentes no cimento que irão determinar a liberação de calor de hidratação e ainda, a velocidade de hidratação inicial de cada composto é proporcional à área específica do cimento, ou seja, quanto maior a área específica de um composto maior será a sua velocidade de hidratação, evidenciado na Figura 2.2, que apresenta resultados da taxa de liberação de calor durante 24 horas de hidratação para 3 pastas de cimentos produzidos com o mesmo clínquer, porém com finuras e composições diferentes.

Figura 2.2 – Resultado de calorimetria isotérmica realizada durante 24 horas para 3 tipos de cimentos (BENTZ, 2010) – adaptada pela autora.

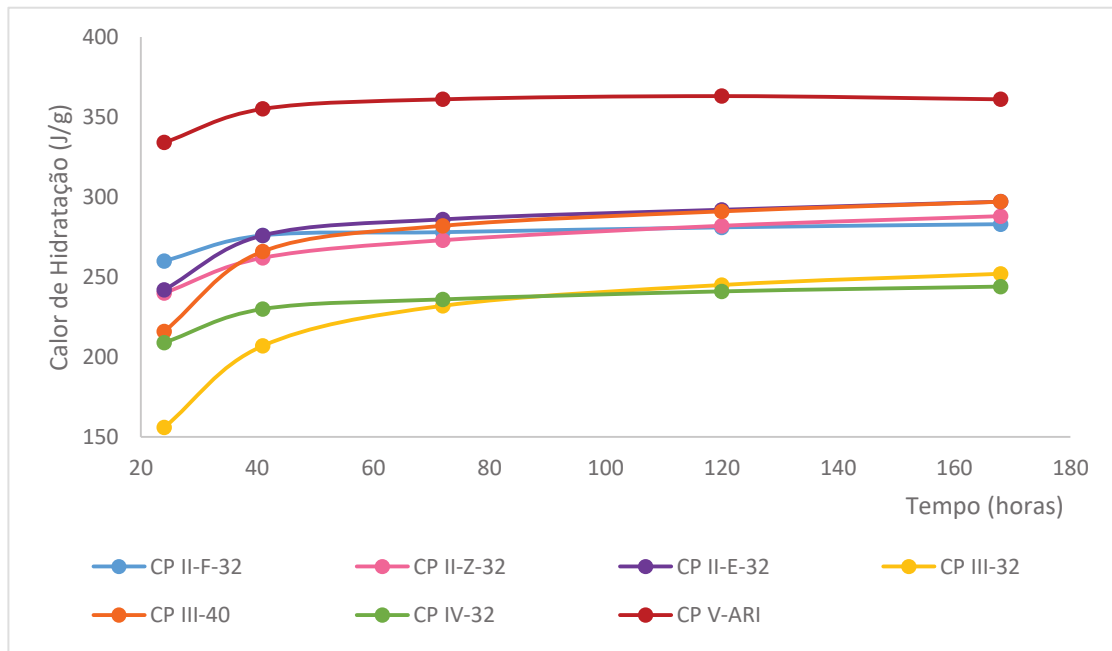


Verbeck e Foster (1950 *apud* BENTZ, 2010) estimaram por meio de um conjunto de dados, que para cimentos com finuras entre 2850 cm<sup>2</sup>/g e 4900 cm<sup>2</sup>/g, um aumento de 1000 cm<sup>2</sup>/g, equivale a um aumento de 40 J/g no calor de hidratação de 7 dias. Em estudo mais recente realizado por Bentz (2010), houve um aumento de 46 J/g ao se comparar cimentos com 689 cm<sup>2</sup>/g de diferença de finura que pode ser justificado pela composição recente dos cimentos com maiores percentuais C3S e C3A, as duas fases mais reativas no início das reações.

A Figura 2.3 apresenta os resultados médios (30 a 40 amostras) referentes a sete tipos de cimento produzidos no Brasil. Os valores foram obtidos nos ensaios realizados pela Associação Brasileira de Cimento Portland, conforme a NBR 12006/90 Cimento – Determinação do Calor de Hidratação pelo Método da Garrafa de Langavant. Vale ressaltar que o calor de hidratação varia em função das características químicas e físicas do cimento,

recomendando-se a realização de ensaios específicos no material a ser utilizado no concreto (ABCP, 2012).

Figura 2.3 – Calor de Hidratação de tipos distintos de cimento (ABCP, 2012).



Em casos de concreto massa, para minimizar o problema da elevação de temperatura, deve se fazer uso de cimentos com baixo calor de hidratação que usam o máximo permitido de pozolanas como cinzas volantes ou escórias como substitutos do cimento, desde que atinja os requisitos de norma (GADJA;VANGEEM, 2002)

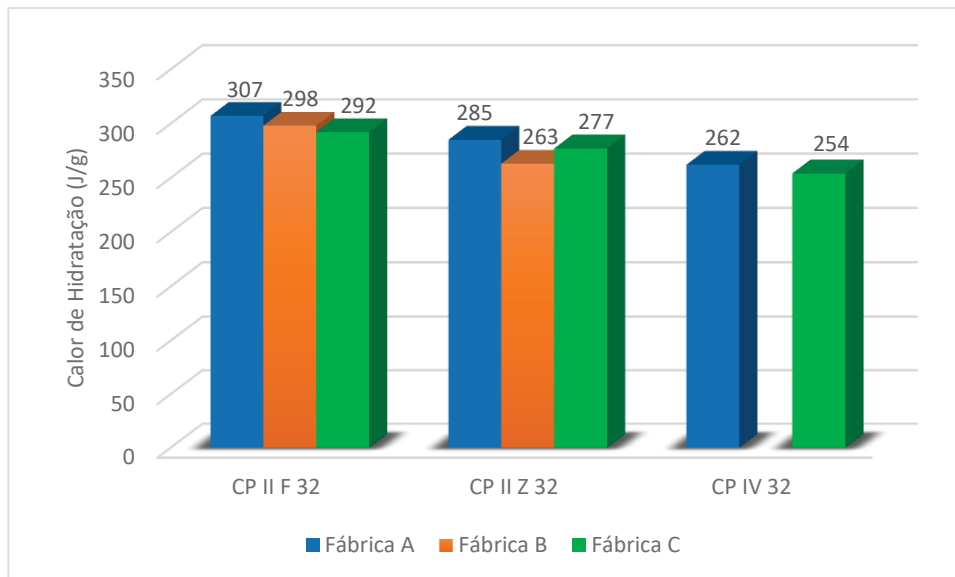
A Tabela 2.2 apresenta as prescrições normativas sobre calor de hidratação pelas normas brasileira e europeia.

Tabela 2.2 – Prescrições normativas de calor de hidratação para cimento Portland (ABCP, 2012).

Normas	Tempo (hrs)	Calor de hidratação (J/g)	Classificação do cimento
<b>NBR 13116/94 Cimento de baixo calor de hidratação</b>	72	$\leq 260$	Baixo calor de hidratação
	168	$\leq 300$	
<b>Norma Européia EM 197-3</b>	41	$\leq 220$	Muito baixo calor de hidratação
	41	$\leq 270$	Baixo calor de hidratação
	41	$\leq 320$	Moderado calor de hidratação

Na Figura 2.4 apresenta os resultados referentes a três tipos de cimento de três fábricas distintas na região Nordeste do Brasil. Cimentos com a mesma nomeação, apresentam comportamentos distintos com relação a liberação de calor, o que mostra que dependendo da composição do mesmo, esse resultado final pode ser afetado.

Figura 2.4 – Calor de Hidratação de cimentos com as mesmas características, porém produzidos em fábricas distintas (ABCP, 2012).



### 2.1.1.2. Consumo de cimento

Outro fator que está diretamente relacionado com a liberação de calor durante o processo de hidratação é o consumo de cimento, portanto concretos que necessitem de alto consumo para desempenhar a função de que foram solicitados, como é o caso dos concretos de alto desempenho e concretos auto adensáveis, estão sujeitos a maiores problemas advindos ao calor de hidratação.

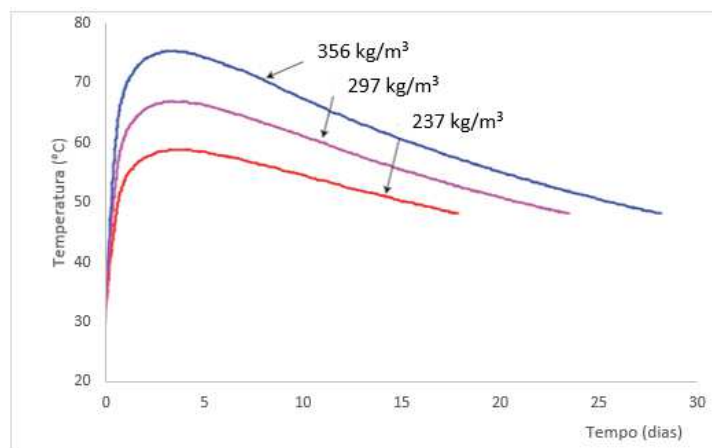
Nesses casos, várias medidas podem ser tomadas para a redução da temperatura como a escolha do tipo de cimento, substituição de cimento por adições minerais, uso de pozolana de argila calcinada, uso de agregados resfriados, uso de água em forma de gelo ou circulação de água fria no interior do volume de concreto lançado (MEHTA; MONTEIRO, 2008; PAULON; KUPERMAN, 1981), porém algumas dessas ações podem ter um custo financeiro relativamente alto ou depender de equipamentos e materiais não disponíveis no local, portanto

uma das opções mais viáveis é a redução ao máximo do calor gerado através da redução das reações de hidratação, ou seja, reduzir o consumo de cimento (REBMANN, 2011).

Além da sua importância na redução do calor de hidratação e consequente minimização da fissuração, a refrigeração do concreto possibilita a redução do consumo de cimento. Cifu e Kuperman (2006) citam que para cada grau centígrado de redução da temperatura de lançamento do concreto é possível reduzir aproximadamente 0,3% do consumo de cimento.

A Figura 2.5 ilustra o quanto a diferença de calor é influente, conforme aumenta-se a quantidade de cimento na mistura, aumenta-se também o tempo necessário para retornar à mesma temperatura.

Figura 2.5 – Desenvolvimento de temperatura em concretos com diferentes consumos de cimento (GADJA; ALSAMSAM, 2006).



Nota-se que, à medida que se aumenta a quantidade de cimento na mistura, ocorre uma maior elevação adiabática de temperatura no concreto, fator inerente ao surgimento das tensões térmicas.

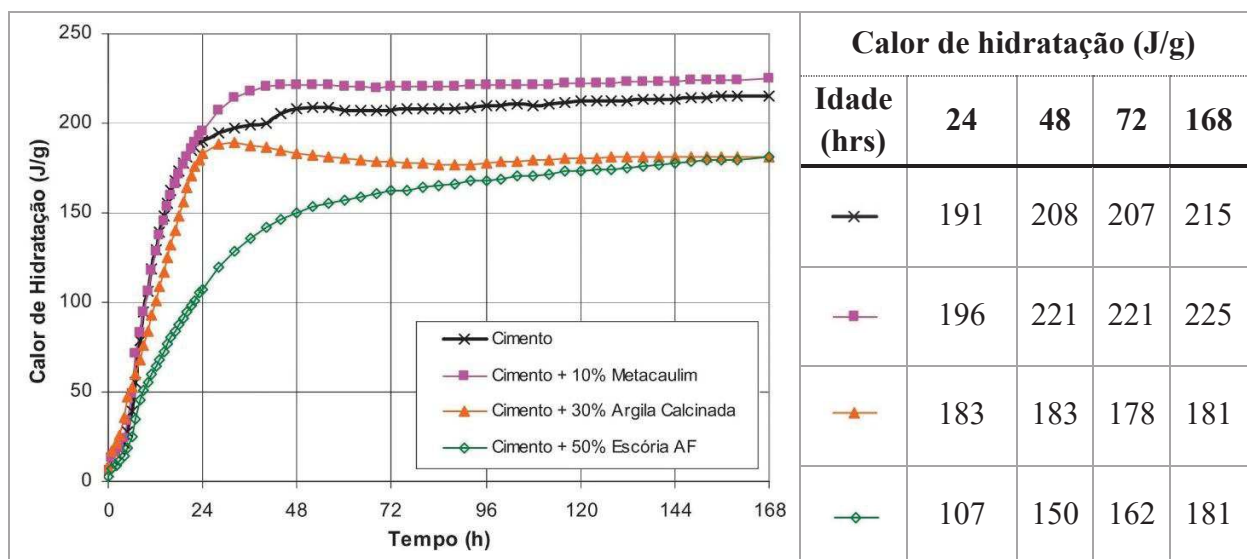
Gajda e Alsamsam (2006) estimam, por meio de uma maneira simplificada, que para elementos de grande volume e com dimensão mínima de 1,8 metros, cada quilo de cimento Portland comum por metro cúbico de concreto, equivale a um acréscimo de aproximadamente 0,132°C na temperatura final do concreto. Esse acréscimo de temperatura pode variar entre 0,10°C a 0,20°C, dependendo de fatores externos, como a temperatura ambiente.

Uma medida comum para minimizar os efeitos do calor de hidratação do concreto é evitar uma exagerada elevação da temperatura na estrutura através de intervenções na composição

do material. Assim, com esse objetivo, pode-se, por exemplo, minimizar o uso de cimento, através de substituições. Na década de 1930 já se estudava o material com o intuito de reduzir a geração do calor de hidratação do cimento utilizando, por exemplo, adição de material pozolânico (FARIA *et al.*, 2004).

A substituição de parte do cimento por material pozolânico modifica consideravelmente as curvas de elevação adiabática e também a velocidade de crescimento do calor gerado pela hidratação do cimento (ABCP, 1987). Na Figura 2.6, observa-se comportamentos distintos para diferentes casos de substituição, em que se analisam concretos de diferentes resistências à compressão e com o mesmo consumo de cimento equivalente, em peso, e mesmo consumo de água, mantendo fixo a relação a/c. No caso do uso de metacaulim em substituição ao cimento, os valores do calor de hidratação são maiores quando comparados com um concreto sem substituição, confirmando sua potencialidade reativa com os compostos do cimento, já no caso da escória, ocorre uma menor taxa de calor de hidratação e o menor valor absoluto, desde as primeiras horas do ensaio até o término. Esse comportamento é diferente no caso da substituição por argila calcinada, que apresenta uma taxa de calor de hidratação semelhante a do cimento e do metacaulim até a idade de 24 horas, depois não acompanha a mesma evolução dos mesmos, gerando um calor de hidratação intermediário, maior que a escória, porém menor que a do cimento (SANTOS, 2011).

Figura 2.6 – Evolução do calor de hidratação do cimento e das suas combinações com adições (SANTOS, 2011)



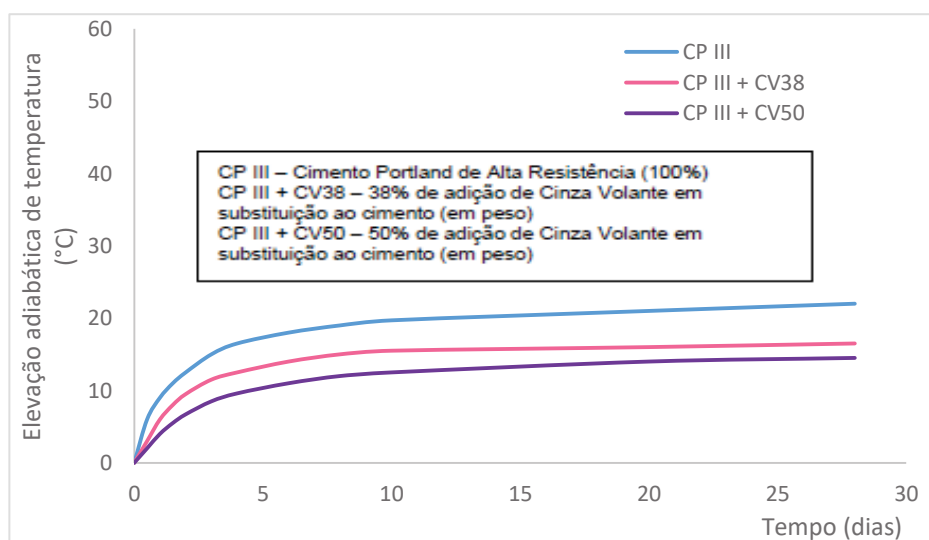
As adições minerais mais utilizadas são a escória de alto forno, e pozolanas como a cinza volante, a sílica ativa, certas argilas calcinadas e agregados pulverizados (FARIA *et al.*, 2004).

As pozolanas são materiais cimentícios com forte teor de  $\text{SiO}_2$  amorfo ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ ) que reage com o hidróxido de cálcio (CH) formado pelas diversas reações de hidratação, dando origem à formação de novos hidratos de C-S-H (FARIA *et al.*, 2004). A substituição de clínquer por pozolanas reduz a cinética da reação de hidratação, podendo reduzir também a sua amplitude, se a pozolana for de baixa reatividade (FURNAS, 1997).

Os fíleres são materiais com granulometria inferior à granulometria dos cimentos e têm a função de preencher espaços vazios. Como não são reativos, os fíleres não produzem efeito pela sua adição, mas sim pela diminuição da quantidade de cimento utilizado nas misturas, o que naturalmente irá reduzir a taxa de geração de calor da mistura como um todo (FARIA *et al.*, 2004).

A ação de cinzas volantes para a redução da geração de calor é exemplificada na Figura 2.7, em que se compara diferentes adições de cinza volante com um concreto de referência que não apresenta adição.

Figura 2.7 – Efeito da substituição parcial de cimento por cinza volante no concreto (FURNAS, 1997).

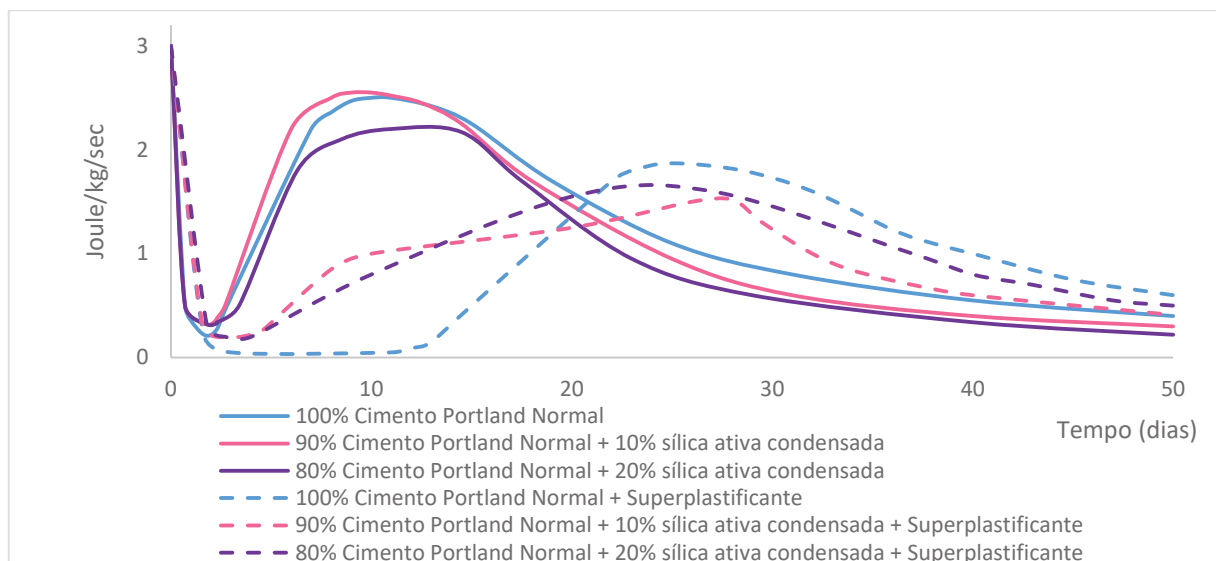


Outra forma de minimizar o problema do calor de hidratação e a prevenção das fissuras de origem térmica é o uso de aditivos plastificantes e superplastificantes. A concepção original para o qual os aditivos químicos foram idealizados estavam relacionados basicamente com o

ganho de plasticidade, porém por volta dos anos 80, com o uso em maior escala, foram desenvolvidos aditivos redutores de água de maior eficiência na mistura (SANTOS, 2011). Esses aditivos preservam e até mesmo melhoram a trabalhabilidade do concreto fresco, para a mesma relação água/cimento. Ao se reduzir a água, diminui-se também a quantidade de cimento o que, conseqüentemente, reduz a quantidade de calor gerada nas reações de hidratação.

Uma forma de se combater o aumento do calor de hidratação é a combinação de aditivos e adições no concreto, possibilitando ainda mais a redução do consumo de cimento. Na Figura 2.8 pode-se observar que a substituição por sílica ativa possibilita uma queda no calor total liberado, porém quando combinado com o superplastificante, percebe-se uma aceleração no desenvolvimento do calor, porém uma redução no calor total gerado.

Figura 2.8 – Taxa de calor liberado por misturas de cimento, sílica ativa e superplastificante (adaptado pelo autor - PINTO, 1997).



### 2.1.1.3. Aspectos geométricos e dimensionais

Um dos fatores que influenciam a retração térmica é a geometria da estrutura, porém além disso, também é considerado outros fatores como: condições climáticas durante a execução, temperaturas médias da região, temperatura de lançamento, quantidade e tipo de materiais empregados, propriedades do concreto endurecido, tipo de cura, altura das camadas de lançamento e seus intervalos de execução, dimensionamento das juntas de contração e dimensões da estrutura. A estrutura de concreto tendo suas dimensões reduzidas terá

consequentemente o calor gerado pela hidratação difundido para o ambiente e o pico térmico menor, entretanto, à medida que as dimensões aumentam, esse pico torna-se mais elevado, aumentando, consequentemente, o gradiente de queda para o equilíbrio com o ambiente e a potencialidade de fissuração, sendo que as fissuras de origem térmica geralmente originam-se a partir de camadas junto à fundação ou a partir de camadas lançadas sobre concretos antigos devido ao elevado módulo de elasticidade (ANDRIOLO; SKWARCZYNSKI, 1988; PETRONILHO; SIGOLO, 2011).

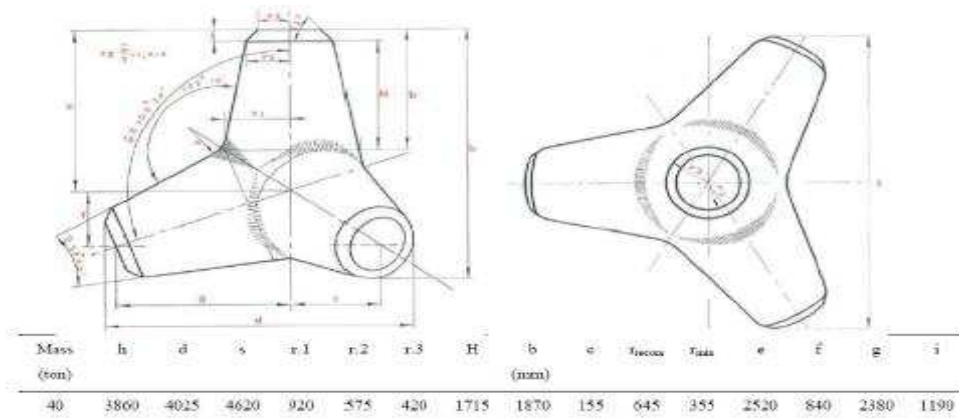
No desenvolvimento de empreendimentos que façam uso de concreto passíveis de patologias de cunho térmico, além de cuidados para controlar o calor de hidratação do cimento, deve-se levar em conta também a geometria da estrutura, a fim de evitar fissuras que possam ser potencializadas pelo efeito térmico.

O cálculo da distribuição de temperaturas em estruturas com geometria complexa e a incorporação das etapas do processo construtivo é umas das maiores dificuldades encontradas pelos profissionais responsáveis pelas análises térmicas (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

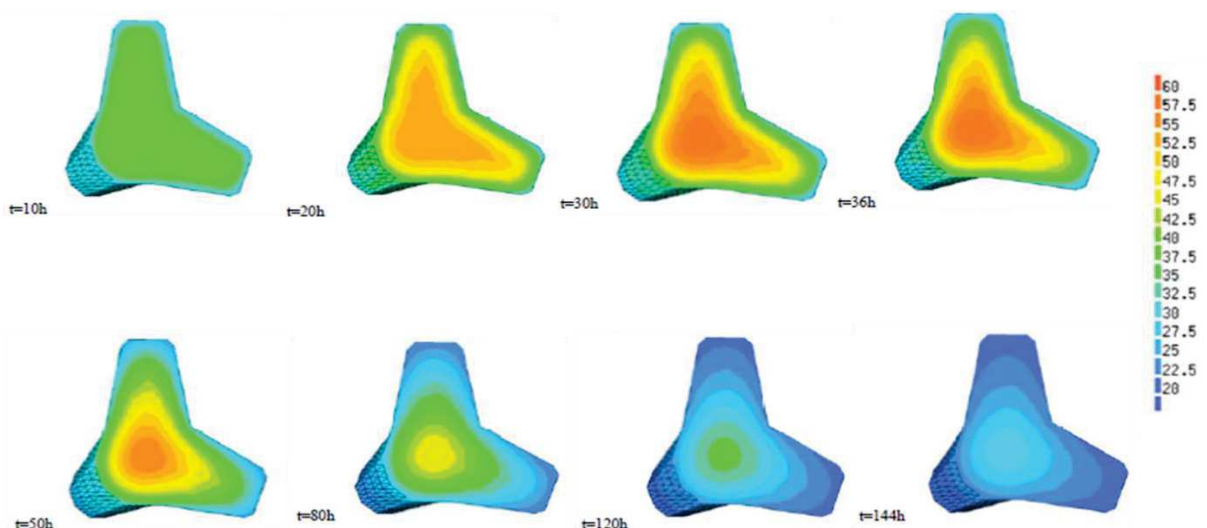
Azenha *et al.* (2011) analisaram os efeitos térmicos de um tetrápode (Figura 2.9), que é uma peça utilizada na proteção de quebra-mares, consistindo num bloco de concreto simples constituído por quatro pernas tronco-cónicas irradiando de um ponto central, construído conforme a geometria mostrada na Figura 2.10.

Figura 2.9 – Construção de um quebra-mar – colocação de tetrápodes (AZENHA, 2004).



Figura 2.10 – Geometria da seção (AZENHA *et al.*, 2011).

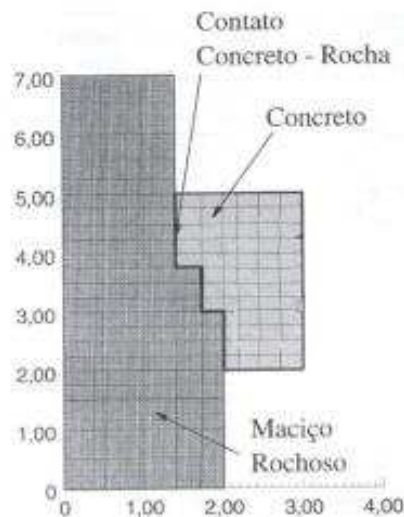
A Figura 2.11 mostra os resultados obtidos por Azenha *et al.* (2011) para 10 h, 20 h, 30 h, 36 h, 50 h, 80 h, 120 h e 144 h em três dimensões. Observa-se a temperatura máxima no tetrápodo para 36 h de concretagem, atingindo 59°C no centro geométrico da estrutura e as temperaturas mínimas na superfície. O gradiente máximo de temperatura também ocorreu com 36 horas, apresentando aproximadamente 30°C de diferença de temperatura entre a superfície e o interior da estrutura. A duração de 144 horas de análise não foi suficiente para possibilitar que todo o volume da estrutura atingisse um equilíbrio térmico com a temperatura ambiente.

Figura 2.11 – Resultados obtidos por Azenha *et al.* (2011) para o tetrápodo.

Coelho (2012) e Krüger (2001) realizaram trabalhos em que se analisava o efeito térmico do concreto massa diante de diferentes parâmetros, situações geométricas, condições de contorno e espessuras de camada. Ambas tiveram um estudo de caso em relação ao estudo realizado

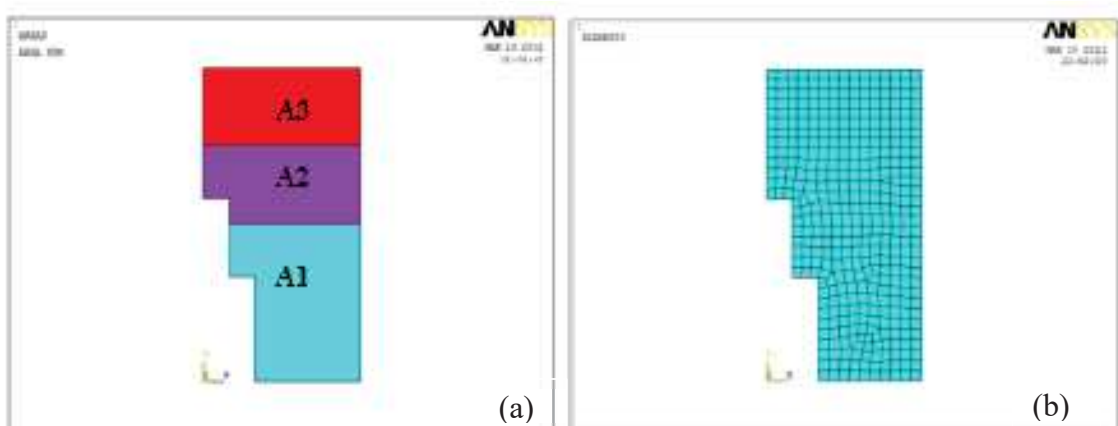
por FURNAS (1997), referente às vigas de uma ponte rolante da Usina Hidrelétrica (UHE) Serra da Mesa, localizada na Bacia do Alto Tocantins. A Figura 2.12 mostra a geometria da viga estudada.

Figura 2.12 – Geometria da viga estudada (FURNAS, 1997).



FURNAS (1997) considerou a viga construída em três camadas, sendo a primeira de 1,5 m de espessura e as demais de 0,75 m de espessura e temperatura ambiente de 27°C. Para análise ele considerou a concretagem com intervalos de 7 e 14 dias; em todos os casos encontrou temperatura máxima no concreto de 51,7°C. A Figura 2.13 mostra as áreas estudadas e a malha utilizada na análise da viga.

Figura 2.13 – (a) Áreas estudadas e (b) malha utilizada na análise da viga (FURNAS, 1997).



No estudo de Krüger (2001), cada camada era identificada como uma área e para a solução do problema foram inicialmente ativados apenas os nós dos elementos referentes à primeira área

(primeira camada = primeiro bloco). Foram aplicados nos nós ativos carregamentos nodais, com o valor da temperatura inicial e as condições de contorno do problema. Os nós inativos foram restringidos, ou seja, tiveram seus graus de liberdade anulados de modo a se evitar instabilidade numérica. Efetuou-se a primeira resolução do problema, com intervalo de tempo infinitesimal, definindo-se a distribuição de temperaturas inicial para os demais passos de carga da análise transiente da camada.

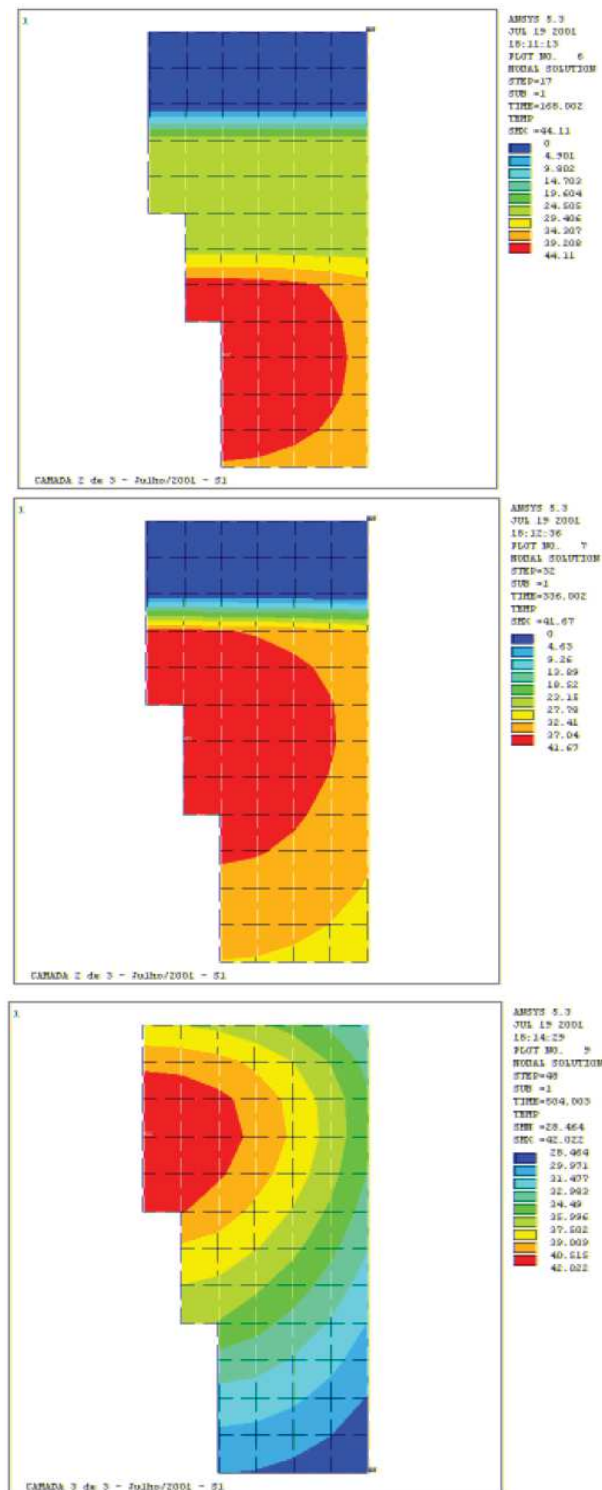
Posteriormente foram ativados os elementos da segunda camada, restringindo-se os nós que permaneceram inativos (da terceira camada). Aplicaram-se a temperatura inicial e as condições de contorno desta nova camada. Efetuou-se novamente uma análise com intervalo de tempo infinitesimal, e foram repetidos os passos da análise da primeira camada. Obteve-se a nova distribuição de temperaturas que considerou, além das condições de contorno já definidas, a influência da primeira sobre a segunda camada. Os passos descritos foram repetidos para a terceira camada, até ser obtida a distribuição de temperaturas no tempo final desejado.

Analisando a viga para intervalos de concretagem de 7 dias, os resultados obtidos são mostrados na Tabela 2.3 e na Figura 2.14.

Tabela 2.3 – Temperatura máxima para a viga (COELHO, 2012; KRÜGER, 2001).

CAMADAS	TEMPERATURA MÁXIMA	
	INTERVALO DE LANÇAMENTO	
	7 dias (COELHO, 2012)	7 dias (KRÜGER, 2001).
<b>1</b>	43,1°C	44,3°C
<b>2</b>	43,6°C	43,7°C
<b>3</b>	46,1°C	44,2°C

Figura 2.14 – Isotermas de temperatura para concretagem de camadas - intervalo de 7 dias (KRÜGER, 2001).



Segundo Coelho (2012), quanto à mudança geométrica, observa-se que a mudança apenas da superfície tem pouca significância em relação ao valor máximo de temperatura obtido. Porém, o ponto de valor máximo depende da geometria. Para a mudança da espessura e largura de

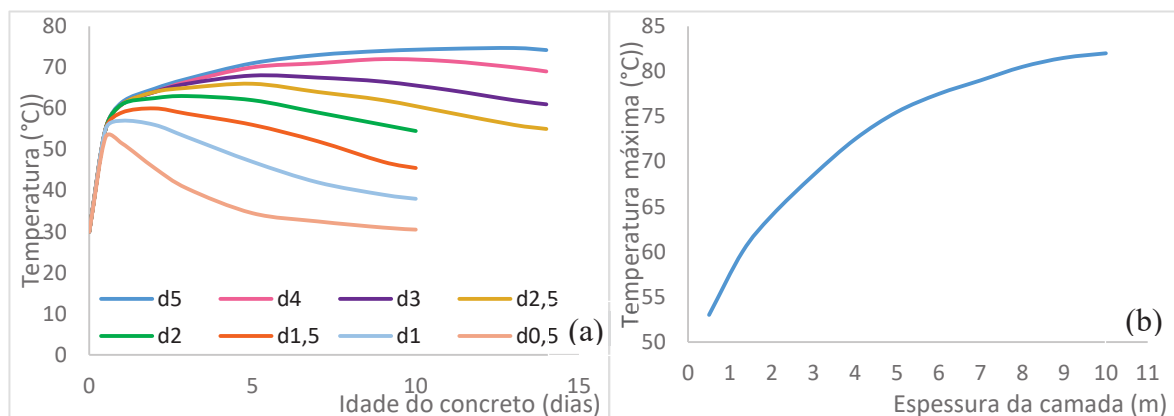
concretagem, notou-se que há um grande aumento para dimensões até 2 m; após esse valor há um aumento com menor velocidade.

Quanto maior a espessura da camada, no método da construção em camadas, e quanto menor o tempo do intervalo de lançamento do concreto, maior será a temperatura atingida pelo concreto, sendo que o tempo possui maior influência que a espessura da camada. Dessa forma é recomendável uma construção em camadas e com um bom intervalo de tempo entre as construções (COELHO, 2012), porém também deve-se considerar que ao se concretar em camadas e com um intervalo de tempo entre elas, a camada anteriormente concretada terá um módulo de elasticidade mais elevado, muitas vezes desconhecido, podendo gerar restrições mais consideráveis na estrutura, aumentando, conseqüentemente, o potencial de fissuração.

Choktaweekarn e Tangtermsirikul (2010) fizeram um trabalho mostrando resultados analíticos para as variações de temperatura em diferentes regiões de um bloco de concreto (topo, centro e região inferior), apresentando também o estudo das variações de temperatura para diferentes espessuras de concreto. Os resultados foram encontrados com a utilização do método dos elementos finitos.

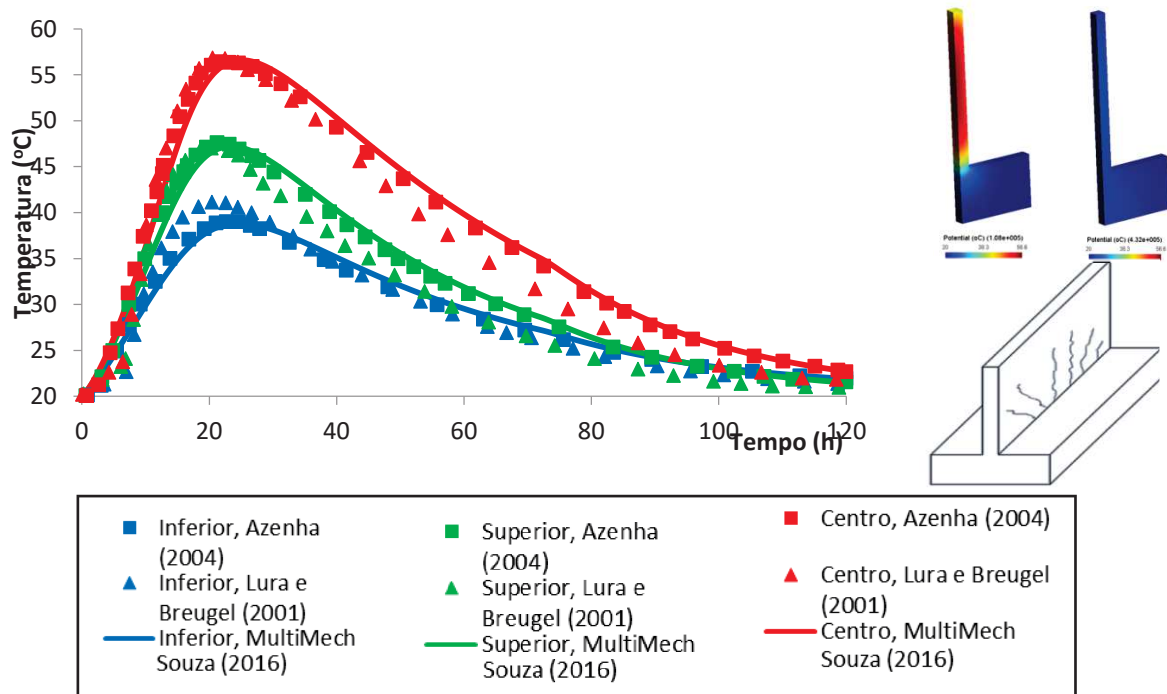
A Figura 2.15(a) mostra a variação da temperatura para diferentes espessuras do concreto, por exemplo, d0.5 representa a espessura da camada igual a 0,5 m. Na Figura 2.15(b), apresenta-se a curva da temperatura máxima atingida de acordo com a espessura da camada.

Figura 2.15 – (a) Variação da temperatura do concreto para diferentes espessuras do concreto (modificado pela autora - CHOKTAWEEKARN; TANGTERMSIRIKUL, 2010). (b) Curva da temperatura máxima do concreto em relação a espessura (modificado pela autora - CHOKTAWEEKARN; TANGTERMSIRIKUL, 2010).



Dessa forma, pode-se notar que a temperatura do concreto varia com a espessura da camada e com a variação do tempo. Quanto mais espessa a camada, maior será a temperatura máxima atingida na reação de hidratação do cimento, até um certo valor que deverá ser próximo da temperatura de lançamento mais a adiabática. A variação de temperatura também muda com a região do concreto analisada, como pode ser notado na Figura 2.16. Para o centro da estrutura têm-se as maiores temperaturas atingidas, enquanto no topo acontece o inverso. Isso resulta num gradiente de temperatura para o concreto que é o responsável pela fissuração, por isso o isolamento térmico da superfície no processo de cura é importante.

Figura 2.16 – Variação da temperatura em relação do tempo para diferentes posições no concreto em um muro de arrimo (SOUZA, 2016; AZENHA, 2004; LURA E BREUGEL, 2001)



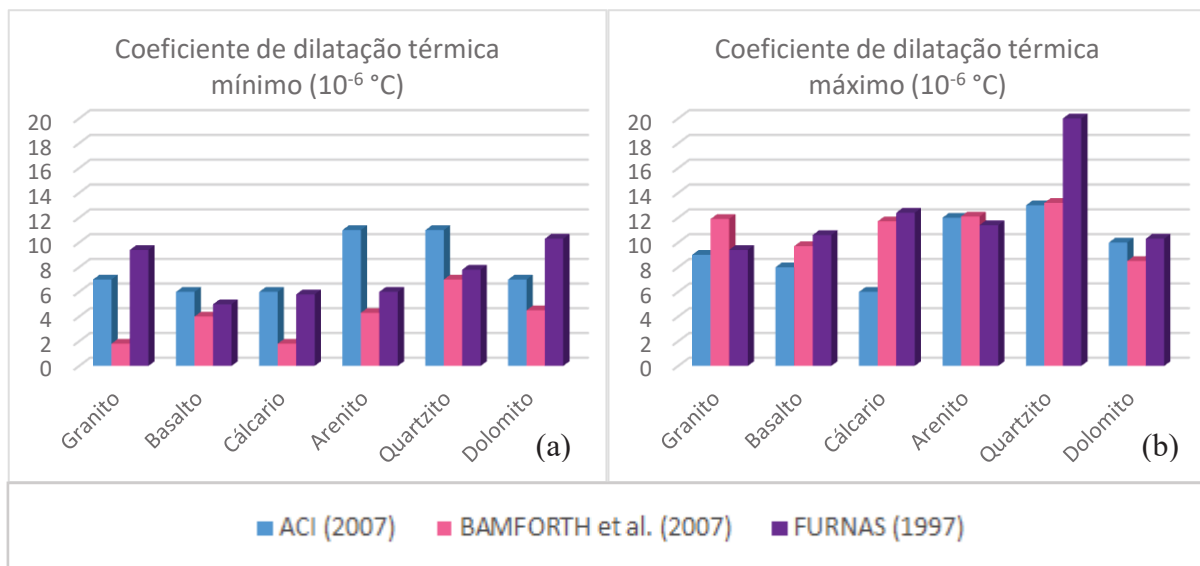
#### 2.1.1.4. Tipo e consumo de agregados

Os agregados normalmente correspondem de 65 a 75% do volume de concreto, portanto o seu comportamento e suas características são fortemente influenciados pelo tipo dos agregados. Características como capacidade de retração, índice de compressibilidade e módulo de elasticidade estão ligadas ao tipo de agregado e sua capacidade de absorção de água e as propriedades térmicas do concreto (condutividade, difusividade, coeficiente de dilatação térmica) são influenciadas pelas proporções e propriedades termofísicas e os minerais

constituintes dos agregados presentes na mistura e também os componentes existentes na pasta de cimento (PAULON, 1987; BENTZ, 2007; KOSMATKA *et al.*, 2003).

Na Figura 2.17 estão apresentados valores de coeficiente de dilatação térmica de agregados de diversas litologias, segundo ACI (2007), EUROCODE 2 (BAMFORTH *et al.*, 2007) e Furnas (1997).

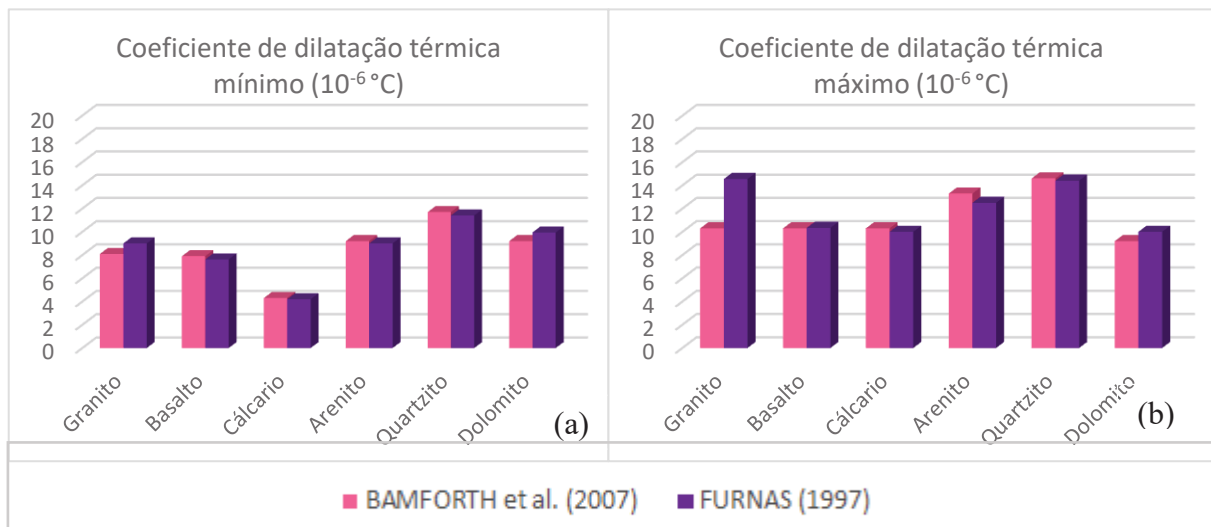
Figura 2.17 – Coeficientes de dilatação térmica de agregados de diversas litologias (ACI, 2007; BAMFORTH *et al.*, 2007; FURNAS, 1997). (a) Coeficientes mínimos; (b) Coeficiente máximos.



Segundo Azenha (2004) e Morabito (1998), para previsão do calor gerado por uma dada mistura de concreto é realmente necessário ensaiar amostras deste material, uma vez que os ensaios de pastas de cimento apenas fornecem um ponto de partida para estimar a geração de calor da mistura (conhecidas as proporções da mistura e as características térmicas dos agregados). Essas estimativas podem não conduzir a valores rigorosos, uma vez que a presença dos agregados pode alterar a própria cinética das reações de hidratação, dificultando as previsões.

Na Figura 2.18 estão apresentados valores de coeficiente de dilatação térmica de concreto fabricado com agregados de diversas litologias, segundo EUROCODE 2 (BAMFORTH *et al.*, 2007) e Furnas (1997).

Figura 2.18 – Coeficientes de dilatação térmica de concretos com agregados de diversas litologias (BAMFORTH *et al.*, 2007; FURNAS, 1997). (a) Coeficientes mínimos; (b) Coeficiente máximos.



Gadja e Vangeem (2002); Kosmatka *et al.* (2003) e Neville (1997) também relatam que quando o agregado escolhido tem baixa expansibilidade térmica, como é o caso do cálcario, permitem um maior gradiente de temperatura aceitável, chegando até  $31^{\circ}\text{C}$ , para o controle de fissuração, enquanto para os concretos com alta expansibilidade térmica, esse gradiente não deve ultrapassar  $20^{\circ}\text{C}$ .

A expansibilidade do concreto é diretamente proporcional a expansão térmica do agregado. Isso significa que a seleção de um agregado com baixa expansibilidade térmica irá reduzir o potencial de fissuração do concreto.

## 2.2 MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS DE ORIGEM TÉRMICA POR CALOR HIDRATAÇÃO

### 2.2.1. Fissuras por retração

Fissuras em estruturas de concreto massa são indesejáveis, pois afetam a permeabilidade, a durabilidade, aparência e as tensões internas das estruturas. As fissuras ocorrem, normalmente, quando as tensões de tração desenvolvidas excedem a resistência à tração do concreto, devendo ser prevista já em projeto para se tomar as medidas de controle prévio no momento do lançamento do mesmo (CIFU; KUPERMAN, 2006) Estas tensões de tração

podem ocorrer devido às cargas impostas à estrutura, mas frequentemente ocorrem devido à restrição por causa da mudança volumétrica. No entanto, a maior alteração volumétrica em concreto massa é resultado da modificação da temperatura, principalmente pela geração do calor de hidratação (TOWNSEND, 1981).

Segundo Fairbairn *et al.* (2003) e Carvalho (2012), grandes estruturas de concreto, tais como barragens, blocos de fundação e lajes de pontes, podem estar sujeitas a fissurações principalmente nas primeiras idades de maturação do cimento Portland devido às tensões térmicas e a indução da retração autógena, por isso é importante assegurar que a evolução de calor seja controlada, permitindo assim que a mistura desenvolva uma microestrutura densa, homogênea e livre de fissuras. Do ponto de vista da engenharia, estas tensões podem ser evitadas com algumas medidas preventivas que tentam reduzir os efeitos térmicos na reação de hidratação do cimento. Entre elas pode-se citar:

- Escolha de um material capaz de reduzir a reação de hidratação do cimento e as tensões de retração autógena;
- Controlar a espessura das camadas e o intervalo de tempo entre as camadas para permitir a dissipação do calor;
- Redução da temperatura de lançamento do concreto ou realizar a pós-refrigeração.

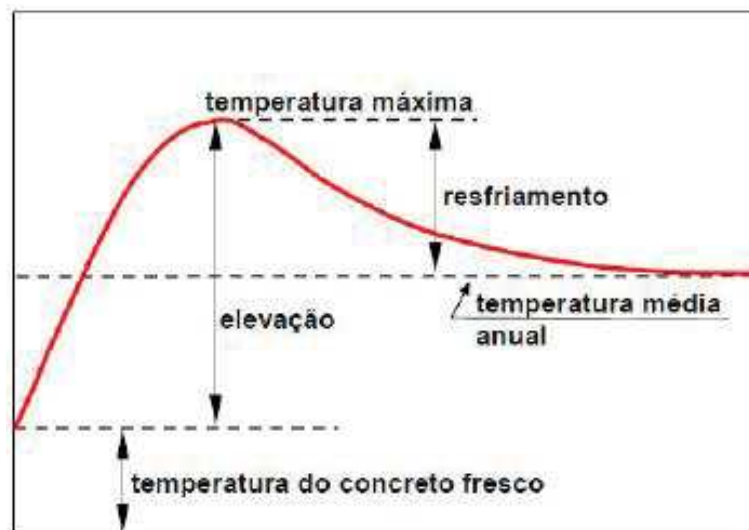
A análise de estruturas de materiais à base de cimento se faz imperativa dentro do quadro teórico dos acoplamentos termo-químico-mecânicos quando os carregamentos devidos aos efeitos da hidratação são predominantes (FAIRBAIRN *et al.*, 2003). Tais carregamentos são as deformações, causadoras das tensões, devidas às variações transientes de volume por efeitos térmicos (exotermia das reações de hidratação) e químicos (retração autógena). Para que o problema termo-químico-mecânico seja modelado com precisão, é de fundamental importância que seja considerada a termo-ativação da exotermia das reações de hidratação. As reações exotérmicas têm por característica o aumento da velocidade ou da taxa de hidratação com o aumento da temperatura. (GOMES, 2011).

As variações de temperatura ambiente e no concreto endurecido originam mudanças de forma e volume, provocando movimentação de contração e dilatação. Se tais mudanças são impedidas pela vinculação da estrutura da obra, resultam tensões que podem produzir a fissuração do concreto (CASTRO; MARTINS, 2006; DNER, 1994).

O concreto quando submetido a elevadas temperaturas tende a se expandir proporcionalmente ao seu coeficiente de dilatação térmica. Nas idades iniciais o concreto se apresenta no estado plástico, portanto, não apresenta restrições consideráveis, porém à medida que as reações de endurecimento vão ocorrendo e o concreto passa para o estado viscoelástico, as restrições à expansão do concreto aumentam, submetendo-o a tensões de compressão, as quais são de pequena magnitude devido aos efeitos de fluência nas idades iniciais.

A expansão do concreto ocorre até o instante em que a temperatura máxima é atingida e a partir deste instante começa a ocorrer o seu resfriamento e a conseqüente contração. O concreto tende a voltar à sua forma inicial, caso haja restrição à sua movimentação, podem ocorrer tensões de tração. O resfriamento do concreto ocorre até a estabilização da temperatura, ou seja, até o instante em que o concreto atinge o equilíbrio com a temperatura ambiente, conforme apresentado esquematicamente na Figura 2.19.

Figura 2.19 – Variação de temperatura no concreto (WENDLER; TURRA; SERIGHELI JÚNIOR, 2007).



É importante a caracterização física e química dos materiais e a compreensão das reações envolvidas no processo de hidratação para que seja possível a utilização de modelos de previsão que apoiem a tomada de decisões em relação à mistura do concreto a utilizar em cada situação, tendo em vista minimizar o risco de fissuração deste material (AZENHA, 2004).

A diferença entre as temperaturas internas e externas do concreto massa, ou seja, o gradiente de temperatura, faz com que o concreto se deforme ocasionando as fissuras. Quanto maior o

gradiente de temperatura, maior a possibilidade do surgimento de fissuras, e maior também as aberturas dessas fissuras devido ao aumento das tensões (COELHO, 2012). De acordo com o ACI (2011), a temperatura máxima atingida no concreto massa não deve ultrapassar 70°C e a diferença de temperatura máxima entre o centro e a superfície de colocação não deve ultrapassar 19°C, podendo variar de acordo com a litologia do agregado. Essas temperaturas devem ser medidas de acordo com plano de controle térmico para se evitar problemas como fissuras no concreto.

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), a tensão de tração resultante do resfriamento do concreto pode causar fissuração dependendo do módulo de elasticidade, do grau de restrição e da relaxação da tensão decorrente da fluência do concreto e é determinada pela equação 2.1.

$$\sigma_t = K_r \cdot [E / (1 + \phi)] \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (2.1)$$

em que:

$\sigma_t$  = tensão de tração;

$K_r$  = grau de restrição;

$E$  = módulo de elasticidade;

$\phi$  = coeficiente de fluência;

$\alpha$  = coeficiente de dilatação térmica;

$\Delta T$  = variação de temperatura.

Se as estruturas de concreto tivessem total liberdade para se deformar quando sujeitas a uma variação de temperatura, o concreto não seria submetido a nenhum esforço interno, sofrendo apenas variações em suas dimensões, proporcionais aos gradientes térmicos aplicados.

No entanto, sempre existem restrições externas e/ou internas às deformações do concreto, resultantes da ligação das estruturas com suas fundações ou com outras estruturas, da ligação do concreto com as armaduras (no caso de concreto armado) e também da coesão interna do próprio concreto

O concreto massa fica restringido, externamente, pela fundação de rocha ou, internamente, pelas deformações diferenciais em diferentes áreas do concreto devido à presença de gradientes de temperatura. Tais restrições provocam o surgimento de esforços no interior da

estrutura, que podem levá-la à fissuração caso estes esforços sejam superiores à capacidade do concreto de resisti-los.

A avaliação dos graus de restrição presentes em cada parte da estrutura é de grande importância na determinação das deformações e das tensões térmicas atuantes. Embora o grau de restrição a ser adotado em cada caso deva ser objeto de análise específica, o ACI (1978) apresenta um critério geral que pode ser útil na definição de tal parâmetro. Segundo tal critério, o coeficiente de restrição pode ser determinado a partir das equações abaixo:

$$Kr = \left[ \frac{(L/H - 2)}{(L/H + 1)} \right]^{h/H} \quad L/H > 2,5 \quad (2.2)$$

$$Kr = \left[ \frac{(L/H - 1)}{(L/H + 10)} \right]^{h/H} \quad L/H \leq 2,5 \quad (2.3)$$

Em que:

$Kr$  = Coeficiente de restrição;

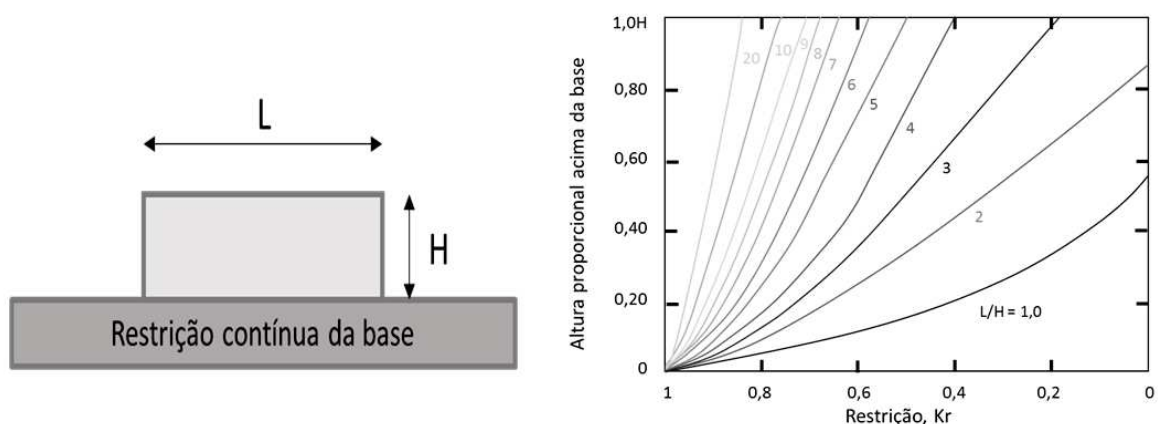
$L$  (m) = comprimento da estrutura;

$H$  (m) = altura da estrutura;

$h$  (m) = altura do nó onde está sendo calculada a tensão.

No caso de fundação rígida, há restrição total na interface concreto rocha ( $Kr = 1,0$ ) e à medida que aumenta a distância em relação à base, a restrição diminui, como apresentado na Figura 2.20.

Figura 2.20 – Grau de restrição de tração na seção central. (MEHTA; MONTEIRO, 2014).



As análises de tensões e/ou de deformações são realizadas a partir dos resultados dos cálculos de temperaturas efetuados para cada condição de lançamento estudada. Para cada hipótese, determinam-se as tensões e/ou deformações resultantes dos gradientes térmicos que atuarão na estrutura, as quais terão de ser resistidas pelo concreto.

Além do coeficiente de restrição acima destacado pode-se ainda considerar o efeito da rigidez da fundação nas tensões térmicas. Esse efeito pode ser representado, segundo ACI (1978), utilizando um multiplicador que ameniza os efeitos tensionais a partir de uma correlação entre os módulos de elasticidade da fundação (EF) em relação ao do concreto lançado (EC). Para o concreto massa com área de contato com a fundação, recomenda-se os valores descritos na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Multiplicadores da tensão para a rigidez da fundação em relação ao concreto lançado (ACI, 1978).

EF / EC	Multiplicador
$\infty$	1,0
<b>2</b>	0,83
<b>1</b>	0,71
<b>0,5</b>	0,56
<b>0,1</b>	0,20

Durante a construção de um empreendimento no município de Goiânia, foram observadas fissuras oriundas de retração térmica por calor de hidratação, conforme apresentado na Figura 2.21. No caso em específico, a resistência característica do concreto era de 35 MPa (CASCUDO, 2014).

Figura 2.21 – Fissuras observadas em bloco de fundação decorrentes do calor de hidratação (CASCUDO, 2014).



A restrição interna se origina do fato de que, quando a superfície externa do concreto pode perder calor para o ambiente, se desenvolve um diferencial de temperatura entre o exterior frio e o interior quente do elemento de concreto, não sendo o calor dissipado para o exterior de modo suficientemente rápido em vista da baixa difusividade térmica do concreto. Como resultado as deformações de origem térmica são diferentes nas diversas partes do elemento de concreto. A restrição da dilatação resulta em tensão de compressão em uma parte do elemento e tração em outra. Surgem fissuras na superfície se, devido à contração do exterior do elemento, a tensão de tração na superfície for maior do que a capacidade de deformação (NEVILLE, 1997).

### 2.2.2. Formação tardia da Etringita

A etringita, também conhecida na literatura como trissulfoaluminato de cálcio hidratado, é normalmente o primeiro produto a cristalizar-se durante a primeira hora e hidratação do cimento à temperatura ambiente, contribuindo para o enrijecimento, pega e desenvolvimento da resistência inicial da pasta (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

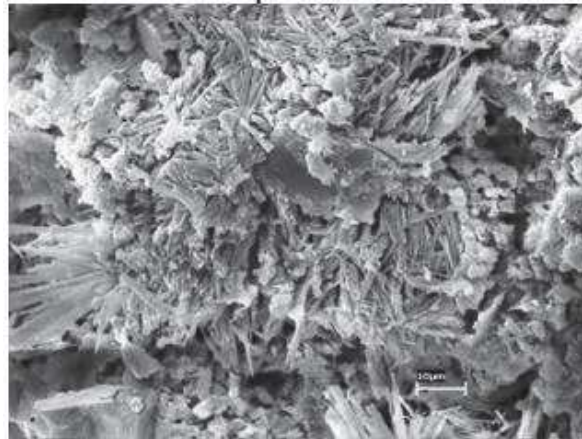
A formação da etringita primária inicia-se dentro dos primeiros minutos após o contato do cimento com a água, ainda no período de pré-indução. Sob condições adequadas, os sulfatos solúveis, tanto os alcalinos presentes no clínquer, quanto os de cálcio, adicionados nas formas de gesso na etapa final de fabricação do cimento, dissolvem-se rapidamente e reagem com o  $C_3A$ , precipitando-se na forma de etringita (ODLER, 2007). De acordo com Taylor (1997), os cristais formados nos primeiros minutos têm cerca de 250 nm de comprimento e 100 nm de espessura e são encontrados nas superfícies dos grãos de cimento e a pouca distância deles. Neste estágio de hidratação, segundo Collepardi (2003), a etringita não causa danos por expansão em virtude da alta fluidez da pasta.

Para a maioria dos cimentos Portland, se a hidratação ocorre em temperaturas variando entre 15°C e 25°C, com a relação água-cimento entre 0,45 e 0,65, os picos de etringita na difração de Raios X (DRX) são detectados em poucas horas após o seu início, atingindo o seu máximo após 24 horas (TAYLOR, 1997).

A formação da etringita tardia, apresentada na Figura 2.22, também conhecida na literatura pela sigla DEF (*Delayed Etringite Formation*), é um processo complexo, envolvendo a formação da etringita em material cimentício já endurecido, sem que nenhum sulfato

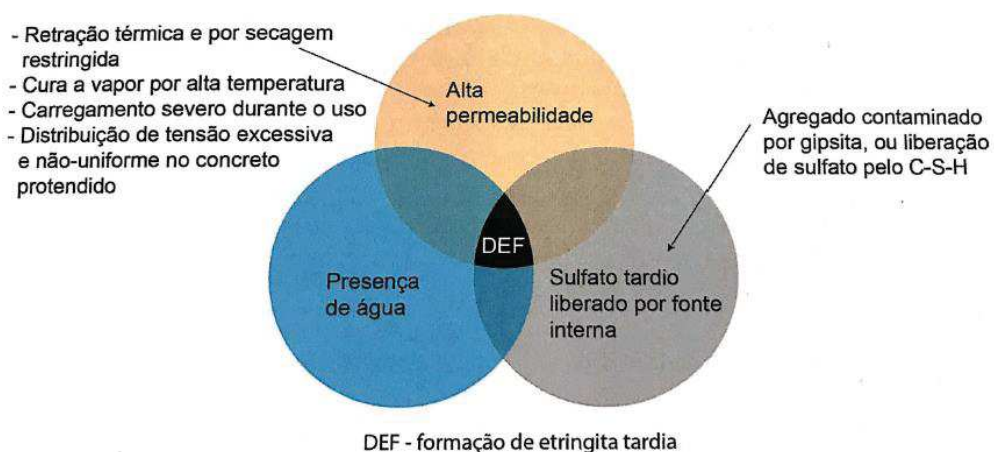
provenha do meio externo, que envolve altas temperaturas de cura e cuja fonte de sulfatos é o próprio cimento. (THAULOW, JOHANSEN, JACOBSEN, 1997; JOHANSEN, THAWLOW; 1999).

Figura 2.22 – Etringita ou trissulfoaluminato de cálcio hidratado em argamassa (HASPARYK, 2005).



Segundo Collepardi (1999), a formação de etringita tardia não está limitada a peças de concreto submetidas à cura térmica e que adsorção e dessorção do sulfato pelo C-S-H não é essencial para o fenômeno. Na Figura 2.23 é apresentada uma representação do enfoque de Collepardi para a formação de etringita tardia relacionada à expansão e fissuração.

Figura 2.23 – Enfoque holístico de Collepardi para expansão e fissuração por formação de etringita tardia. (MEHTA; MONTEIRO, 2014).



A formação de grandes quantidades de etringita em pasta de cimento e concreto, induzem a expansão e fissuras, caso tenha restrições. Essa expansão pode ser considerável, sendo

medidas expansões lineares em pasta maiores que 175% em um ano (ODLER; GASSER, 1988).

Taylor, Famy e Scrivener (2001) relatam que DEF tem sido observada em alguns casos de deterioração de concretos que foram curados termicamente a temperaturas próximas ou superiores a 70°C, em contrapartida, Gomes (2011) expõe que a temperatura recomendada para a eliminação do risco considerável de formação de DEF não deve ser superior a 65°C.

Thaulow, Johansen e Jacobsen (1997) e, mais tarde, Johansen e Thawlow (1999), definiram DEF como um tipo especial de ataque por sulfato interno, que envolve altas temperaturas de cura e cuja fonte de sulfatos é o próprio cimento.

Segundo Melo (2010), o efeito das altas temperaturas sobre a microestrutura do concreto é mais bem percebido com o aumento da idade, evidenciado pela presença da etringita neoformada ou tardia nas pastas e poros dos corpos de prova curados termicamente. A quantidade de poros contendo etringita neoformada também aumenta com a idade, o que significa que o processo de formação da etringita tardia depende do ingresso de água no interior do material e, portanto, o tempo de exposição às altas umidades é um parâmetro muito importante.

Os sintomas característicos de DEF em argamassas e concretos são: presença de fissuras multidirecionais, com larguras de aproximadamente 2 cm ou 5 cm, atravessando a matriz cimentícia e contornando os agregados, interconectadas entre si e preenchidas com grandes cristais de etringita (DIAMOND, 1996).

### **2.3 PROPRIEDADES DO CONCRETO**

Para a análise e entendimento dos efeitos térmicos no concreto é necessário antes conhecer suas propriedades físicas, mecânicas e térmicas. Segundo Coelho (2012), para o conhecimento dos estados tensionais do material é necessário que se faça inicialmente um estudo dos processos de tração, compressão e deformação do concreto e ainda do calor específico, da condutividade e da difusividade térmica, pois todas essas propriedades influenciam no desenvolvimento de gradientes de temperatura, deformações térmicas, e fissuração nas primeiras idades do concreto.

### 2.3.1. Propriedades físicas e mecânicas

A hidratação do cimento, e outros efeitos térmicos associados, podem acelerar os processos físicos e mecânicos e ajudar no surgimento de patologias, por isso faz-se necessário a determinação das propriedades de resistência à compressão, resistência à tração e também o módulo de elasticidade do concreto.

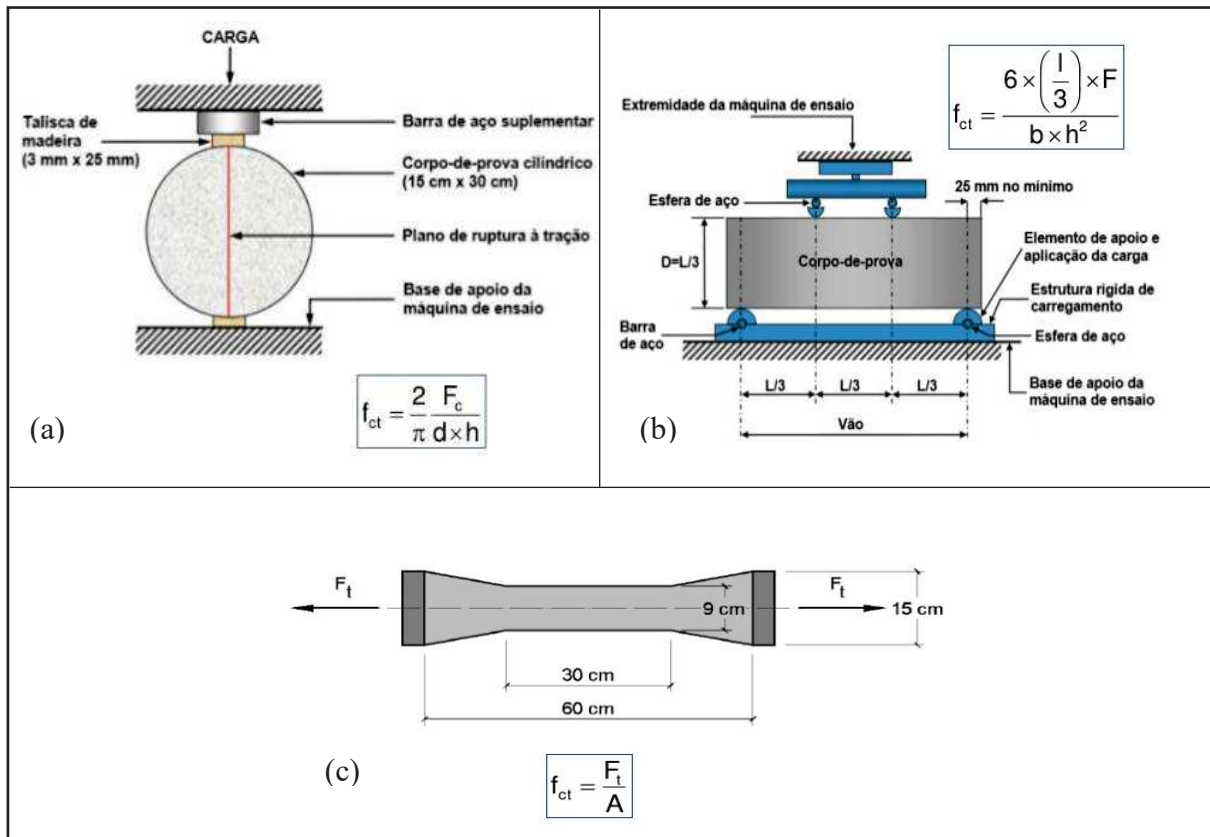
Segundo Mehta e Monteiro (2008), a resistência à compressão do concreto depende de vários fatores que influenciam em sua porosidade, sendo eles, a relação água/cimento, o teor de ar incorporado, o tipo de cimento utilizado, as características dos agregados, o uso de aditivos, as condições de cura, desenvolvimento da idade de hidratação do concreto. Normalmente, é adotado que o comportamento do concreto seja governado somente pela capacidade compressiva, porém isto não significa que este parâmetro seja o único importante.

Em determinadas estruturas, as solicitações predominantes são de tração na flexão (pavimentos de rodovias e de aeroportos, lajes e vigas) ou tração pura (tirantes). Em geral, fissuras só podem ocorrer depois que a capacidade de tração do concreto tiver sido esgotada, o que faz dessa uma importante propriedade no que diz respeito à durabilidade de membros estruturais (OLUOKUN, 1991), portanto para se realizar uma análise tensional do concreto é necessário conhecer as resistências à tração, que podem ser obtidas através de três tipos de ensaios: tração direta, tração por compressão diametral e tração na flexão. No entanto, esses diferentes métodos de ensaios fornecem diferentes valores de resistência à tração para um mesmo material.

O ensaio de tração por compressão diametral é um método indireto para obtenção da resistência à tração do concreto, em que é aplicada uma tensão de compressão na geratriz do cilindro, que é apoiado em duas taliscas de madeira em contato com os pratos da prensa, conforme Figura 2.24(a). O corpo de prova fratura devido à tração desenvolvida em planos diametralmente opostos. No caso da resistência a tração na flexão, o corpo de prova prismático é submetido à flexão, com carregamentos com duas seções simétricas, até a ruptura, conforme Figura 2.24(b) e já no caso da resistência à tração direta, o valor final é determinado aplicando-se tração axial, até a ruptura em corpos de prova de concreto simples, conforme Figura 2.24(c). Todavia, dos três tipos de resistência à tração existentes, Mier e Vliet (2002) citam que a tração direta é a mais adequada, principalmente no que diz respeito à

análise de fissuração, pois se trata de um valor que mais se aproxima do valor real da resistência à tração do concreto.

Figura 2.24 – (a) Ensaio de tração por compressão diametral; (b) Ensaio de tração na flexão; (c) Ensaio de tração direta.



Segundo Farias *et al.* (2003), existe uma incerteza muito grande dentro dos ensaios de resistência à tração direta do concreto pelo fato de diversos fatores influenciarem significativamente no resultado do ensaio, com uma tendência de reduzir o resultado e o esforço predominante na maioria das estruturas são de tração na flexão, mas isso não significa que as trações serão em toda estrutura na flexão, podendo em função de restrições prevalecer a tração direta. Em uma quantidade significativa de resultados de ensaios realizados no laboratório de Furnas Centrais Elétricas, em Aparecida de Goiânia, foram obtidos as seguintes relações entre os tipos de resistência à tração estudados e a resistência à compressão, para diferentes faixas de resistência, apresentados na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Correlações entre a Resistência à Tração e a Resistência à Compressão. (FURNAS, 1997).

Faixa de Resistência à Compressão (MPa)	Método Direto (%)		Método Indireto (%)	
	Leroy	Schumman & Tucker	Tração por Compressão Diametral	Tração na Flexão
5 - 10	11,4	9,6	18,7	26,0
10 - 20	8,1	7,4	13,0	18,6
20 - 30	6,8	6,5	10,6	14,3
30 - 40	6,2	6,2	9,6	14,3
40 - 50	5,9	6,0	9,1	13,6

Outra característica importante para o aparecimento de fissuras no concreto, são as deformações do mesmo. Elas ocorrem devido ao comportamento do material com relação às cargas externas ou como resposta às ações ambientais. As variações volumétricas ou as tensões térmicas sofridas pelo concreto por diferenciais de temperatura podem induzi-lo a fissuração, se ultrapassarem a sua capacidade de deformação ou a sua resistência a tração, quando do seu resfriamento (FURNAS, 1997).

### 2.3.2. Propriedades térmicas

As propriedades térmicas do concreto são de grande importância e estão diretamente ligadas ao desenvolvimento de temperatura no concreto analisado, por exemplo, a massa específica, relação entre a massa de um corpo sobre o volume que esse mesmo corpo ocupa, é diretamente proporcional com o aumento da temperatura, e essa propriedade é influenciada pelo teor de água e de finos, pelos agregados utilizados e pelo índice de vazios. Já o calor específico, parâmetro físico que expressa a capacidade de um material armazenar calor e correspondente à quantidade de calor necessária para elevar em um grau a temperatura de uma unidade de massa, é inversamente proporcional ao aumento da temperatura, diminui com o aumento da dimensão máxima característica do agregado gráudo e é pouco alterado pela composição mineralógica do agregado (FURNAS, 1997; COELHO, 2012).

A condutividade e difusividade térmica do concreto também devem ser levadas em consideração em análises térmicas, sendo a primeira a capacidade de o material conduzir calor e definido como a relação entre o fluxo de calor e o gradiente de temperatura e a segunda a

propriedade que expressa a capacidade de difusão de calor em todas as direções e indica a facilidade com que o concreto tolera variações de temperatura.

A condutividade térmica é influenciada pela composição do concreto, teor de umidade, características mineralógicas do agregado, densidade e temperatura do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2008). De acordo com Furnas (1997), essa condutividade tem valores que variam de 1,4 a 3,6 (W/m.K).

A difusividade térmica é influenciada pelo teor de umidade do concreto, que depende do teor inicial de umidade da mistura, do grau de hidratação do cimento e da exposição à secagem e ainda varia de acordo com os diferentes tipos de agregado, aumenta com o aumento da dimensão e do volume do agregado, reduz com o aumento do fator água/cimento e aumenta com o aumento da temperatura. Os valores estão entre 2 a 6 ( $10^{-3}$  m<sup>2</sup>/h) (FURNAS, 1997). A difusividade térmica é calculada de acordo com a equação 2.4.

$$\delta = \frac{k}{c\rho} \quad (2.4)$$

Em que:

$\delta$  = difusividade térmica;

k = condutividade térmica;

c = calor específico;

$\rho$  = massa específica do concreto – para efeito de cálculo pode-se adotar para o concreto simples valor 2 400 kg/m<sup>3</sup> e para o concreto armado 2 500 kg/m<sup>3</sup> (NBR 6118, 2007).

Quando o concreto é lançado rapidamente em urna estrutura massiva, o calor de hidratação desenvolvido fará com que ela atinja temperaturas que precisam ser conhecidas previamente, através de modelos matemáticos. Por esse motivo, é necessário o conhecimento da curva de elevação adiabática do concreto até uma idade em que a geração de calor já tenha se estabilizado ou encontra-se próximo desta situação (FURNAS, 1997).

Vários estudos já foram realizados para se determinar todas essas propriedades do concreto que gerou um banco de dados bastante expressivo, que é possível ser utilizado caso não se tenha conhecimento dos mesmos, porém o ideal é que sempre se faça todos os ensaios necessários.

## 2.4 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE TEMPERATURA E TENSÕES

A geração de calor internamente no concreto provoca efeitos que são capazes de danificar a estrutura, sendo um problema para os construtores. Alguns recursos, como a utilização de softwares, podem prever e avaliar a temperatura interna no concreto massa. Este processo permite a identificação das maiores temperaturas atingidas, do tempo de evolução do calor e dos locais de temperatura crítica na estrutura. Com esses dados é possível buscar soluções para melhor adequação ao problema.

Há diversos métodos para a avaliação da variação de temperaturas no interior de estruturas, tais como o Método das Diferenças Finitas (MDF), o Método dos Elementos de Contorno (MEC) e o Método dos Elementos Finitos (MEF). A complexidade geométrica das estruturas, bem como a variabilidade dos diversos fatores que influenciam a distribuição de temperaturas levam à necessidade de serem empregadas ferramentas numéricas para a solução de diversos problemas. Os processos são usualmente computacionais por requererem um grande volume de cálculo, de forma a simular as condições de lançamento e intervalos de tempo de análise (KRÜGER, 2001).

Um exemplo de software que pode ser utilizado nesses problemas é o *Ansys*, uma ferramenta poderosa que utiliza o método dos elementos finitos para solução de vários problemas de engenharia, como estruturais, dinâmicos, térmicos, entre outros. O que proporciona uma análise rápida e econômica quando comparada com ensaios experimentais (COELHO, 2012).

Alguns processos de cálculo pelo MDF, com adoção de hipóteses simplificadoras, podem utilizar-se de cálculos manuais, os quais, entretanto, são bastante trabalhosos, sendo conveniente, também nesses casos, o emprego de computador. Tais processos simplificados não permitem considerar, de maneira fiel, as diferentes condições em que ocorrem as trocas de calor através das superfícies das estruturas, o que torna estes processos mais limitados e/ou imprecisos. Entre estes processos podem citar-se o método de Schmidt e o método de Carlson, nos quais a estrutura é dividida em pequenos elementos de volume, calculando-se as temperaturas em cada elemento para diferentes intervalos de tempo. Nestes casos, a precisão dos resultados varia com as dimensões estabelecidas para os elementos de volume e os intervalos de tempo (FURNAS, 1997).

### **2.4.1. Método de Schmidt**

O Método de Schmidt é desenvolvido a partir da equação de Fourier em termos de diferenças finitas.

Para análises de fluxos unidirecionais, os cálculos podem ser efetuados por processo tabular, repetindo-se o equacionamento para os diferentes elementos de volume e intervalos de tempo. Esta análise pode ser efetuada para avaliar pontos no interior de estruturas de grandes dimensões, nas quais o fluxo de calor se propaga em uma direção predominante. Nos demais casos deve ser considerado fluxo bidirecional, sendo mais conveniente o emprego de outros métodos mais precisos, a serem abordados na sequência. A avaliação tridimensional, apesar de refletir mais precisamente as condições de calor, não é usualmente utilizada devido aos resultados satisfatórios obtidos com a análise bidirecional (KRÜGER, 2001).

### **2.4.2. Método de Carlson**

O Método de Carlson considera um corpo sólido formado por diversos prismas independentes, com dimensão suficientemente pequena na direção do fluxo e área unitária na seção perpendicular à direção do fluxo. A dimensão ao longo do fluxo deve ser tal que se possa admitir que a temperatura no centro de cada prisma seja a temperatura média do mesmo e que o calor desenvolvido durante o intervalo de tempo considerado seja constante, sendo linear a variação de temperatura nesse intervalo de tempo (FURNAS, 1997).

Os cálculos das temperaturas podem ser efetuados por processo tabular ou computacional, resolvendo-se repetidamente o equacionamento proposto no método, para diversos intervalos de tempo (KRÜGER, 2001).

### **2.4.3. Método dos Elementos Finitos**

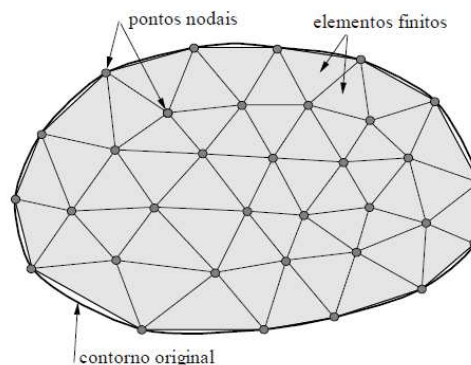
A tecnologia nos permite fazer uso de equipamentos que facilitam a resolução de problemas complexos de engenharia, assim como de outras áreas da ciência. Existem softwares capazes de fornecer respostas precisas em um curto intervalo de tempo para esses problemas, porém o uso de métodos analíticos é indispensável para o entendimento e o uso dos programas computacionais (COELHO, 2012).

No MEF, os cálculos são realizados por meio de programas de computador que permitem facilmente a consideração de fluxo bidirecional de calor. O fluxo unidirecional também pode ser empregado, já que esta hipótese pode apresentar vantagens em alguns casos, com obtenção de resultados satisfatórios. No entanto, na maioria das vezes, mesmo nos casos de estruturas de grandes dimensões, é conveniente a utilização de fluxo bidirecional, no mínimo para algumas hipóteses de cálculo, já que esta alternativa permite simular com fidelidade as trocas de calor através das superfícies das estruturas, sendo a melhor maneira de se determinar o estado térmico do concreto mais superficial e a sua influência nas temperaturas do restante da estrutura (FURNAS, 1997). O Método dos Elementos Finitos utiliza a formulação integral criando sistemas de equações algébricas e proporcionando uma solução aproximada em cada elemento. A solução completa é dada com o somatório dos resultados individuais para cada elemento (MOAVENI, 1999).

A estrutura a ser analisada deve, inicialmente, ser discretizada na forma de uma ou mais malhas de elementos finitos, dependendo das alturas de camadas de concretagem a serem estudadas. As malhas devem representar, realisticamente, a geometria da estrutura e permitir a diferenciação dos materiais envolvidos nas trocas de calor (rocha de fundação e as dosagens empregadas em cada local da estrutura). Devem, ainda, permitir a representação das diferentes alturas de camadas de concretagem a serem estudadas. (FURNAS, 1997).

A resolução pelo MEF é dada dividindo-se o corpo contínuo em um número finito de partes (os elementos), conectados entre si por intermédio de pontos discretos, que são chamados de nós, conforme apresentado na Figura 2.25. A montagem de elementos, que constitui o Modelo Matemático, tem o seu comportamento especificado por um número finito de parâmetros (ALVES FILHO, 2000).

Figura 2.25 – Malha de Elementos Finitos para problema plano (SOUZA, 2003)



Devem ser consideradas as condições de troca de calor entre o concreto e o meio ambiente, podendo envolver diferentes tipos e tempos de remoção de forma e cura, bem como sistemas de pós-refrigeração do concreto por meio de circulação de água através de tubos embutidos na estrutura (WILSON, 1968). De forma geral, o objetivo de uma análise de elementos finitos é simular matematicamente o comportamento de um problema real. Isto é possível a partir da criação de um modelo que represente a situação a ser estudada (COELHO, 2012). Nos programas que utilizam o MEF, o domínio é subdividido em pequenas regiões discretas, conhecidas como elementos finitos. Estes elementos são definidos pela geometria, por nós e funções de interpolação. As equações são escritas para cada elemento, estes elementos são montados e geram uma matriz global. Carregamentos e restrições são aplicados e a solução é então determinada (ANSYS, 2004).

Segundo Furnas (1997), os cálculos de temperaturas pelo MEF se processam a partir da consideração do equilíbrio térmico em cada nó da malha de elementos finitos, equilíbrio este que pode ser descrito, sob a forma matricial, como um sistema de equações diferenciais de primeira ordem, conforme equação 2.5:

$$\bullet \quad CT(t) + KT(t) = Q(t) \quad (2.5)$$

Em que:

C = matriz de capacidade de calor;

K = matriz de condutividade térmica;

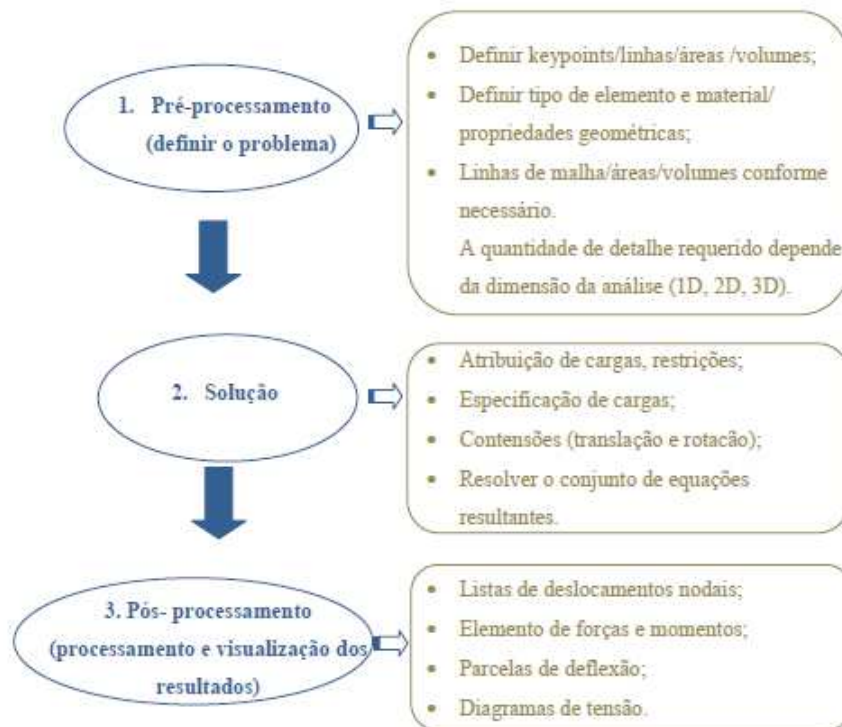
T(t) = vetor das temperaturas nos nós;

$\bullet$   
Ṫ(t) = vetor da taxa de variação das temperaturas nos nós ao longo do tempo;

Q(t) = vetor da taxa de calor suprida aos nós, inclusive o calor gerado nos elementos adjacentes a cada nó.

Segundo Coelho (2012), em geral uma solução em elementos finitos pode ser dividida em três fases, como mostra a Figura 2.26, que representa uma diretriz geral podendo ser usada para a criação de qualquer análise de elementos finitos.

Figura 2.26 – Solução em Elementos Finitos (COELHO, 2012)



## 2.5 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA PARA MODELO DE PREVISÃO

O problema da transferência de calor no concreto é conduzido pela equação de Fourier, apresentada em 2.6:

$$q = -k \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.6)$$

Em que:

T = Temperatura;

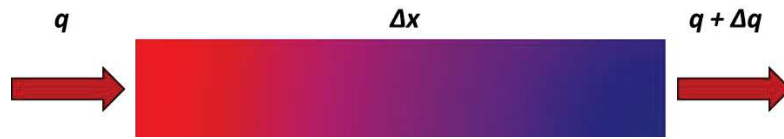
x = espessura;

k = Condutividade térmica;

q = quantidade de calor.

Considerando a propagação de calor em fluxo unidirecional temos a situação apresentada na Figura 2.27.

Figura 2.27 – Propagação de calor em fluxo unidirecional.



O calor introduzido no elemento na unidade de tempo é dado por

$$Aq - A(q + \Delta q) = -A\Delta q = -A\Delta\left(-k\frac{\Delta T}{\Delta x}\right) = kA\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \cdot \Delta x \quad (2.7)$$

Em que:

A= área por onde o calor propaga perpendicularmente

O Calor gerado no elemento na unidade de tempo é:

$$\beta(A \cdot \Delta x) \frac{\partial Q_h}{\partial t} = \beta(A \cdot \Delta x) \cdot \frac{\partial\left(\frac{c\gamma Ta}{\beta}\right)}{\partial t} = A\Delta x c\gamma \cdot \frac{\partial Ta}{\partial t} \quad (2.8)$$

A variação da energia interna do elemento na unidade de tempo é:

$$mc \frac{\partial T}{\partial t} = \gamma A \Delta x \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.9)$$

Aplicando o princípio da conservação da energia resulta:

$$kA \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + Ac\gamma \frac{\partial Ta}{\partial t} = \gamma A \Delta x \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.10)$$

Simplificando

$$h^2 \nabla^2 T + \partial Ta / \partial t = \partial T / \partial t \quad (2.11)$$

Em que:

$h^2$  = difusividade térmica =  $\frac{k}{\gamma \cdot c}$  , onde  $\gamma$  = massa específica

k = condutividade térmica

c = calor específico

Ta = elevação adiabática

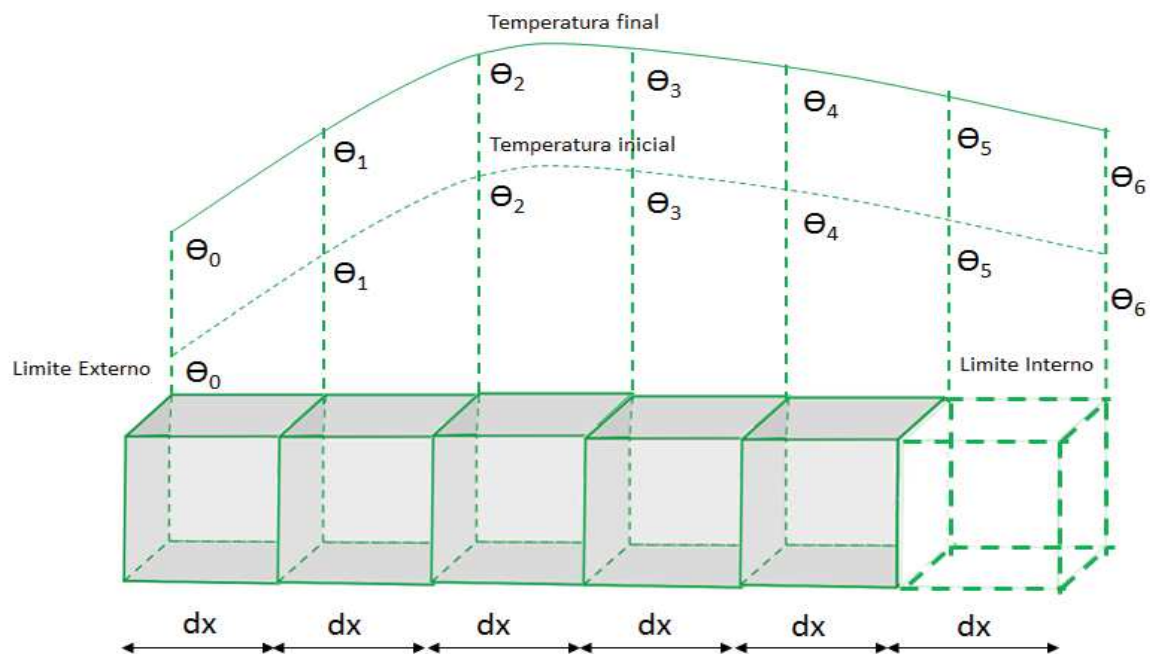
O método de Carlson (Figura 2.28) é fundamentado no método das diferenças finitas e resolvidos manualmente através da régua de cálculo ou máquinas de cálculo de quatro operações, por meio de planilhas escritas à mão, pois na época não havia computadores disponíveis. Também se salienta que estes cálculos eram executados *in loco* pelo fato da grande necessidade de tomar decisões rápidas no canteiro de obra, as equações utilizadas para a resolução da equação (2.12) constam a seguir.

$$C_n = \theta_{n+1} + \theta_{n-1} + 2\Delta T$$

$$L_n = 0,268(\theta_n + L_{n+1})$$

$$\theta_n = L_n + 0,268\theta_{n-1}$$

Figura 2.28 – Diagrama de prismas elementares mostrando a nomenclatura utilizada por Carlson (FURNAS, 1997)



A seguir é demonstrado as equações utilizadas no método das diferenças finitas.

Considerando o volume do qual F seja o centro, a quantidade de calor (Q) introduzido no volume é igual ao produto do gradiente médio de temperatura durante o intervalo de tempo pelo coeficiente de condutividade térmica a área de seção transversal e o intervalo de tempo decorrido, como mostrado na equação (2.7).

$$Q = 2 \frac{(\theta_5 + \theta_5' - \theta_4 - \theta_4')}{2} \cdot \frac{kdt}{dx} \cdot A = m.c.\Delta\theta_5 = A\gamma dx.c.\Delta\theta_5 \quad (2.12)$$

Logo:

$$\Delta\theta_5 = (\theta_5 + \theta_5' - \theta_4 - \theta_4') \frac{k}{\gamma c} \cdot \frac{dt}{dx^2} = (\theta_5 + \theta_5' - \theta_4 - \theta_4') h^2 \cdot \frac{dt}{dx^2} \quad (2.13)$$

A expressão  $\frac{k}{\gamma c} = h^2 = \text{difusividade térmica}$

Fisicamente a difusividade térmica é a velocidade como o material pode estabilizar termicamente.

Fazendo:

$$S = -\frac{\gamma \cdot c \cdot dx^2}{k \cdot dt} = -\frac{dx^2}{h^2 \cdot dt} \quad (2.14)$$

Temos que se na unidade de volume houver um acréscimo de temperatura devido à elevação adiabática de temperatura do concreto.

$$\Delta\theta_5 = -(\theta_5 + \theta_5' - \theta_4 - \theta_4') / S + \Delta\theta \quad (2.15)$$

Em que:

$\Delta\theta$  = Acréscimo de temperatura devido à elevação adiabática de temperatura.

A equação (2.15) fica:

$$-2\theta_4 + \theta_5(2S + 2) = 2\theta_4' + (2S - 2)\theta_5' + 2S\Delta\theta \quad (2.16)$$

O segundo membro da equação (2.16) em sua totalidade consiste de termos constantes e pode ser chamado de  $C_5$ , o índice indica que se aplica à quinta seção. Fazendo a substituição e resolvendo a equação, têm-se:

$$\theta_5 = \frac{C_5 + 2\theta_4}{2S + 2} \quad (2.17)$$

ou

$$\theta_5 = L_5 + Z_5 \cdot \theta_4 \quad (2.17)$$

onde

$$Z_5 = 1/(1+Z) \quad \text{e} \quad L_5 = \frac{C_5 \cdot Z_5}{2} \quad (2.19)$$

A razão da introdução dos símbolos Z e L é com objetivo de simplificar a expressão para a determinação da evolução temporal da temperatura.

De maneira similar pode-se, para o próximo volume as expressões a seguir.

$$\theta_4 - \theta'_4 = -\frac{\theta_4 + \theta'_4 - \theta_3 - \theta'_3}{2 \cdot Z} + \frac{\theta_5 + \theta'_5 - \theta_4 - \theta'_4}{2 \cdot Z} + \Delta\theta \quad (2.20)$$

Agrupando os termos constantes no segundo membro, simplificando e substituindo a equação (2.19) na (2.20), tem-se:

$$-\theta_3 + (2 + 2 \cdot Z) \cdot \theta_4 - L_5 - Z_5 \cdot \theta_4 = C_4 \quad (2.21)$$

Onde pode ser deduzido que a expressão para a temperatura em qualquer estação é dada por:

$$\theta_n = L_n + Z_n \theta_{n-1} \quad (2.22)$$

onde :

$$L_n = (C_n + L_n + 1) \cdot Z_n \quad (2.23)$$

$$C_n = \theta'_{n-1} + (2Z - 2) \cdot \theta'_{n-1} + 2Z \Delta\theta \quad (2.24)$$

$$Z = \frac{dx^2}{h^2 t} \quad (2.25)$$

Além do método proposto por Carlson, o método proposto por Schmidt resolvia o problema pelo método das diferenças finitas de maneira bastante simplificada.

Para esta dissertação a solução da equação pelo método dos elementos finitos em propagação unidimensional basta aplicar o processo de Galerkin, como mostrado a seguir e na Figura 2.29.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial T_a}{\partial t} + h^2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad \text{ou} \quad \nabla^2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{\partial T_a}{\partial t} + \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (2.26)$$

Com acoplamento termoquímico a equação pode ser colada da seguinte forma

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial T_a}{\partial t} + h^2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + L_m \frac{\partial m}{\partial t} \tag{2.27}$$

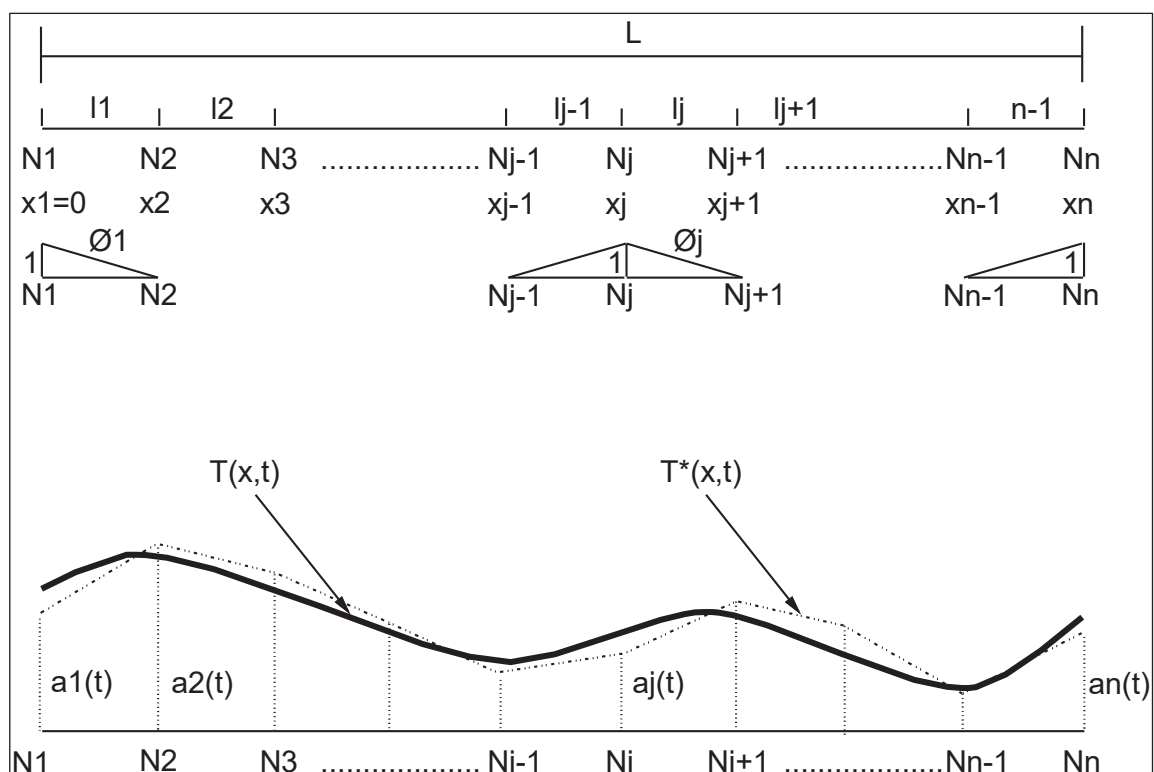
Em que:

$L_m \frac{\partial m}{\partial t}$  é correspondente ao acoplamento termoquímico e representa a geração de calor pela reação de hidratação (exotermia)

$L_m$  é o calor latente de hidratação, positivo devido à natureza exotérmica da reação de hidratação.

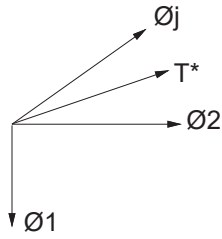
$\frac{\partial m}{\partial t}$  é a velocidade da reação

Figura 2.29 – Aplicação prática do processo de Galerkin para uma propagação unidimensional de temperatura em uma estrutura de espessura L (LEWIS *et al.*, 1996).



Convém salientar que na aplicação a resultados unidimensionais foi desprezado o acoplamento termoquímico.

$$T^*(x,t) = \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \tag{2.28}$$



$\phi_j$  é linearmente independente

$$T^*(x, t) = \sum_{j=1}^N a_j(t) \cdot \phi_j(x) = a_j \cdot \phi_j \quad (2.29)$$

$$\int_0^L \varepsilon^* \phi_i dx = 0 \quad \text{para qualquer } \phi_i \quad i = (1, 2, 3, \dots, n)$$

Pode-se resolver a equação integral da seguinte forma.

$$h^2 \int_0^L \phi_i \frac{\partial^2 T^*}{\partial x^2} dx = \int_0^L \phi_i \frac{\partial T^*}{\partial t} dx - \int_0^L \phi_i T_a dx \quad (2.30)$$

Aplicando a técnica de integração por partes vem:

$$h^2 \int_0^L \phi_i \frac{\partial^2 T^*}{\partial x^2} dx = h^2 \int_0^L \phi_i d\left(\frac{\partial T^*}{\partial x}\right) = h^2 \left[ \phi_i \frac{\partial T^*}{\partial x} \right]_0^L - h^2 \int_0^L \frac{\partial T^*}{\partial x} \frac{\partial \phi_i}{\partial x} dx \quad (2.31)$$

Lembrando das condições de contorno:

a) Contato Concreto ar ( $x=L$ )

$$q = -h_c (T_{ar} - T^*) = -k \frac{\partial T^*}{\partial x} = h^2 \cdot \gamma \cdot c \frac{\partial T^*}{\partial t} \quad (2.32)$$

Lembrando que:

$$\frac{\partial T^*}{\partial t} = \frac{h_c}{h^2 \cdot \gamma \cdot c} [T_{ar} - T^*(L, t)] \quad (2.33)$$

b) Contorno  $x=0$

$$q = -k \frac{\partial T^*}{\partial x} = 0 \quad \text{portanto} \quad \frac{\partial T^*}{\partial x} = 0 \quad (2.34)$$

Levando a Equação (2.9) e a Equação (2.10) na Equação (2.8), vem:

$$h^2 \int_0^L \phi_i \frac{\partial^2 T^*}{\partial x^2} dx = h^2 \left[ \phi_i(L) \frac{h_c}{h^2} (T_{ar} - T^*(L, T)) \right] - h^2 \int_0^L \frac{\partial T^*}{\partial x} \frac{\partial \phi_i}{\partial x} dx \quad (2.35)$$

Levando Equação (2.11) em Equação (2.5), resulta:

$$h^2 \int_0^L \frac{\partial T^*}{\partial x} \frac{\partial \phi_i}{\partial x} dx + \frac{h_c h^2}{k} \phi_i(x_n) T^*(L, t) = \int_0^L \frac{\partial T_a}{\partial t} \phi_i dx + \frac{h_c h^2}{k} \phi_i(x_n) T_{ar}(t) - \int_0^L \phi_i \frac{\partial T^*}{\partial t} dx \quad (2.36)$$

Notando que  $T^* = a_j \phi_j$ , obtém-se:

$$\left[ \int_0^L h^2 \frac{\partial T^*}{\partial x} \frac{\partial \phi_i}{\partial x} dx \right] a_j + \frac{h_c h^2}{k} \phi_i(x_n) \phi_j(x_n) a_j = \int_0^L \frac{\partial T_a}{\partial t} \phi_i dx + \frac{h_c h^2}{k} \phi_i(x_n) T_{ar}(t) - \left( \int_0^L \phi_i \phi_j dx \right) \frac{\partial a_j}{\partial t} \quad (2.37)$$

Fazendo:

$$\phi_i(x_n) \phi_j(x_n) = \varphi_{ij}(n) \quad (2.38)$$

temos:

$$se \ i = j = n \text{ implica que } \varphi_{ij}(n) = 1$$

$$i \neq j \text{ ou } i = j \neq n \text{ implica que } \varphi_{ij}(n) = 0$$

$$\phi_i(x_n) = \varphi_i(n)$$

$$se \ i = n \text{ implica que } \varphi_i(n) = 1$$

$$se \ i \neq n \text{ implica que } \varphi_i(n) = 0$$

Definido as matrizes:

$$[h_{ij}] = \int_0^L h^2 \frac{d\phi_i}{dx} \frac{d\phi_j}{dx} dx + \frac{h_c}{\gamma c} \varphi_{ij}(n) \quad (2.39)$$

Pode-se constatar que esta matriz é de dimensão (n,n) e pode ser nomeada como matriz da condutividade térmica ou difusividade térmica como é mostrada nesta dissertação.

$$[C_{ij}] = \int_0^L \phi_i \phi_j dx \quad (2.40)$$

Esta matriz é denominada de matriz da capacidade calorífica ou do calor específico.

$$[T_a] = \int_0^L \frac{\partial T_a}{\partial t} \phi_i dx + \frac{h_c}{\gamma c} T_{ar} \phi_i(n) \quad (2.41)$$

Este é um vetor com n elementos, conhecido como vetor carga térmica e  $a_j$  é o vetor das temperaturas nodais, em que, segundo Lewis *et al.* (1996), pode ser aplicado para a propagação unidirecional e transformar a equação 2.30 na seguinte expressão :

$$T(t + \Delta t) = [h^2 + C / \Delta t]^{-1} \cdot [W(t) + C \cdot T(t) / \Delta t] \quad (2.42)$$

Em que:

$[h^2]$  = Matriz Difusividade Térmica

$[C]$  = Matriz Calor Específico

$[W(t)]$  = Vetor Carga Térmica

$$[h^2] = \begin{bmatrix} h_1^2/l_1 & -h_1^2/l_1 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ -h_1^2/l_1 & (h_1^2/l_1 + h_2^2/l_2) & -h_2^2/l_2 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & -h_2^2/l_2 & (h_2^2/l_2 + h_3^2/l_3) & -h_3^2/l_3 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & -h_3^2/l_3 & (h_3^2/l_3 + h_4^2/l_4) & -h_4^2/l_4 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & -h_{n-1}^2/l_{n-1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & -h_{n-1}^2/l_{n-1} & -h_{n-1}^2/l_{n-1} + h_c/k_{n-1} \end{bmatrix}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} l_1/3 & l_1/6 & 0 & \dots & 0 \\ l_1/6 & l_1/3 + l_2/3 & l_2/6 & \dots & 0 \\ 0 & l_2/6 & l_2/3 + l_3/3 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & l_1/6 \\ 0 & 0 & \dots & l_1/6 & \dots \end{bmatrix}$$

$$[W(t)] = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial T_a}{\partial t}\right)_1 \cdot l_1 / 2 \\ \left(\frac{\partial T_a}{\partial t}\right)_1 \cdot l_1 / 2 + \left(\frac{\partial T_a}{\partial t}\right)_2 \cdot l_2 / 2 \\ \left(\frac{\partial T_a}{\partial t}\right)_2 \cdot l_2 / 2 + \left(\frac{\partial T_a}{\partial t}\right)_3 \cdot l_3 / 2 \\ \dots \\ \left(\frac{\partial T_a}{\partial t}\right)_{n-1} \cdot l_{n-1} / 2 + h_c \cdot T_{ar} \cdot h_{n-1}^2 / k_{n-1} \end{bmatrix}$$

Em que

$l_i$  = Espessura do elemento

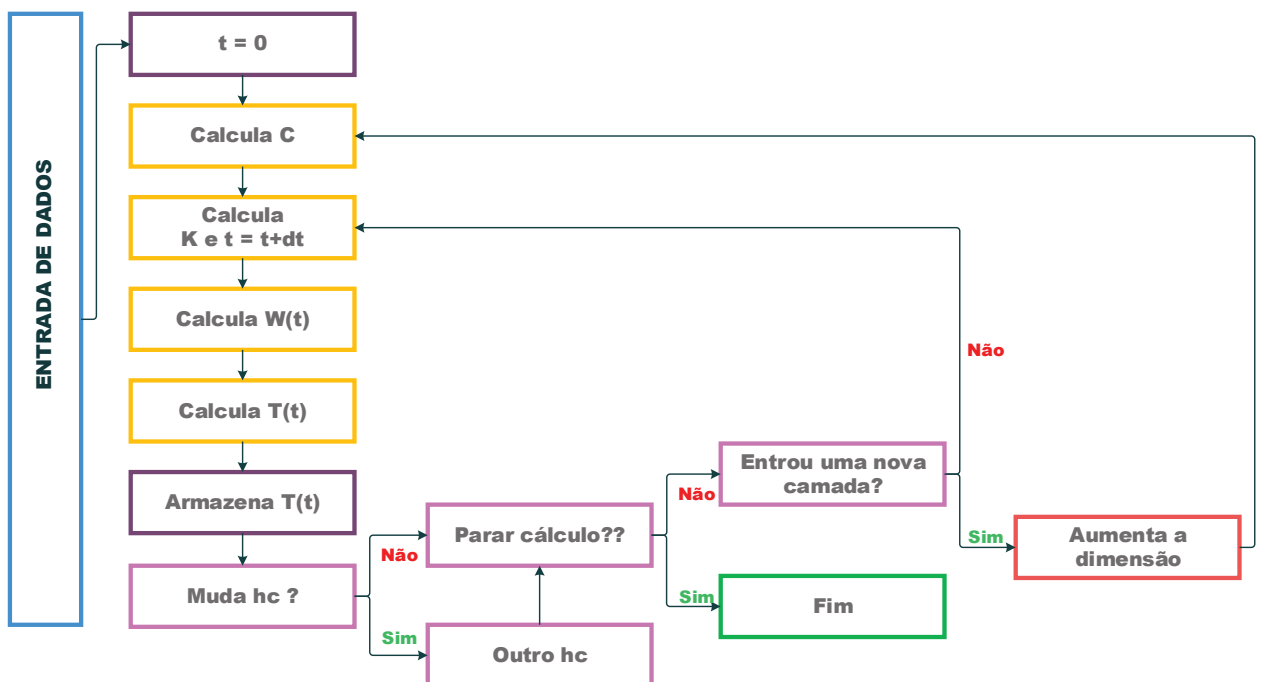
$h_2$  = Coeficiente de transmissão de calor

$T_{ar}$  = Temperatura ambiente

$T_a$  = Elevação Adiabática de Temperatura

Esquemáticamente a metodologia para resolução da equação de Fourier está mostrada na Figura 2.30.

Figura 2.30 – Fluxograma do algoritmo para resolução numérica da equação de Fourier.



## **CAPÍTULO 3**

### **MATERIAIS E MÉTODOS**

Neste capítulo são apresentadas as variáveis adotadas no programa experimental, a descrição e caracterização dos materiais utilizados na pesquisa e ainda os métodos empregados para determinar a dosagem do concreto usado nos blocos que foram submetidos ao monitoramento de temperatura e tensão e ainda os dados que foram utilizados para o desenvolvimento do modelo de previsão de fissuras devido aos problemas de origem térmica.

#### **3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL**

O programa experimental foi elaborado a fim de avaliar as características dos materiais constituintes do concreto, sobretudo o cimento, e assim verificar a influência destas características nas propriedades do concreto. Foi dividido em cinco etapas, a primeira compreendeu a caracterização física e química dos materiais envolvidos na pesquisa. A segunda etapa constituiu em um estudo piloto cuja finalidade foi a de definir os parâmetros de dosagem dos concretos estudados. A terceira etapa consistiu na concretagem dos blocos que simulassem fundações de obras urbanas nas dosagens dos concretos com os traços finais, seguida da descrição dos métodos para o monitoramento da temperatura no interior dos blocos. A quarta etapa consistiu na utilização do modelo proposto pela pesquisa para a simulação de temperatura e tensão dos blocos comparando-o com os resultados obtidos em campo e no modelo *Ansys*, sendo esse último utilizado apenas no âmbito de temperaturas. Por fim, foi realizado um acompanhamento e monitoramento de temperatura e tensão de um bloco de fundação de um empreendimento na região de Goiânia e posteriormente aplicado o modelo *Ansys* e o proposto pela pesquisa, com o intuito de validá-lo como ferramenta confiável de análise, compreendendo a etapa final da pesquisa.

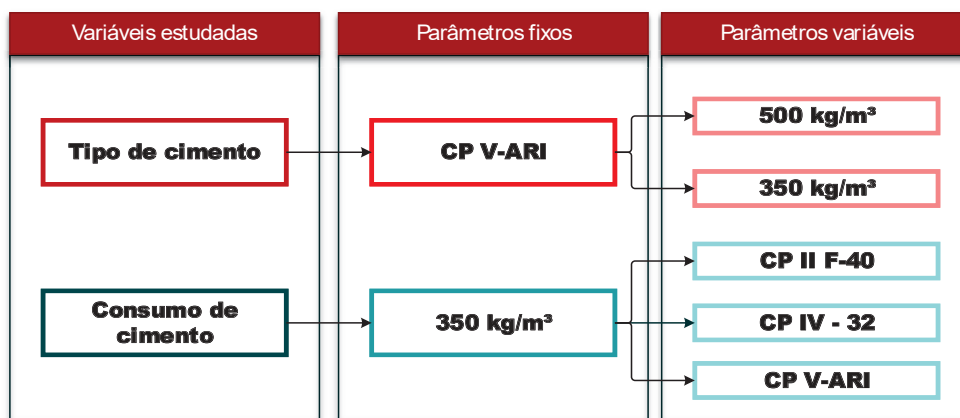
Neste capítulo, são apresentadas as variáveis adotadas no programa experimental, a descrição e caracterização dos materiais utilizados na pesquisa, além da discriminação dos métodos empregados para avaliação das propriedades principais consideradas no trabalho. Para a realização deste trabalho, inicialmente foi realizado um programa experimental em que se objetivava chegar em parâmetros necessários para a posterior modelagem da malha por

elementos finitos.

### 3.1.1. Variáveis estudadas e condições fixas da pesquisa

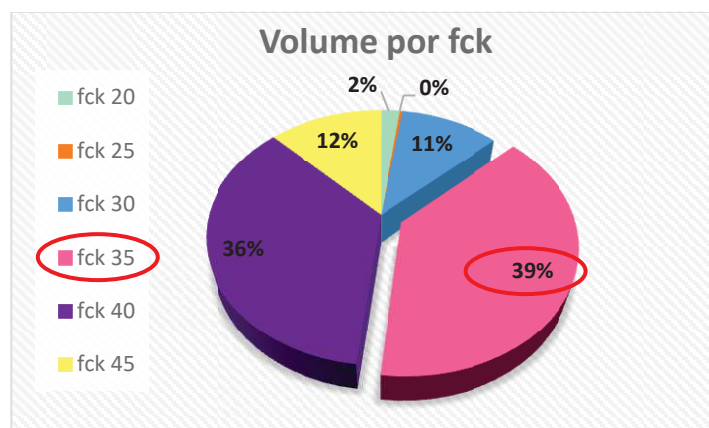
As variáveis estudadas neste programa experimental, visando atingir os objetivos do trabalho, são o tipo e o consumo do cimento empregado no concreto, conforme Figura 3.1. Nos subitens a seguir estas variáveis estão apresentadas juntamente com o detalhamento das condições que serão mantidas fixas para cada uma das variáveis.

Figura 3.1 – Fluxograma das variáveis estudadas.



Com o intuito de estudar concretos mais utilizados na região para blocos de fundações, foi realizado um levantamento no ano de 2016 do número do volume total de concreto fornecido por uma empresa de serviço de concretagem localizada em Goiânia para a concretagem de blocos de fundação e está apresentado na Figura 3.2. Verificou-se que, a resistência característica aos 28 dias (fck) com maior demanda na região foi a de 35 MPa e por esse motivo, foi o fck adotado na pesquisa.

Figura 3.2 – Levantamentos do volume de concreto para blocos de fundação de obras em Goiânia.



### 3.1.1.1. Tipo de cimento

Para a realização desse trabalho foram utilizados os cimentos Portland CP II F – 40, cimento Portland CP IV - 32 e cimento Portland CP V - ARI. A escolha pelo cimento Portland CP II F – 40 é justificada pelo fato de ser o mais comumente empregado na região do estado de Goiás e a escolha pelos cimentos CP IV e o CP V - ARI, é justificada por, teoricamente, apresentarem comportamentos completamente opostos no que diz respeito ao calor de hidratação.

Ao se comparar os concretos com cimentos distintos, as principais características que foram mantidas fixas são: traço de concreto, considerando consumo de cimento igual a  $350 \text{ kg/m}^3$ , o abatimento, tipo de agregados graúdos e miúdos e dimensão do bloco ensaiado.

### 3.1.1.2. Consumo de cimento

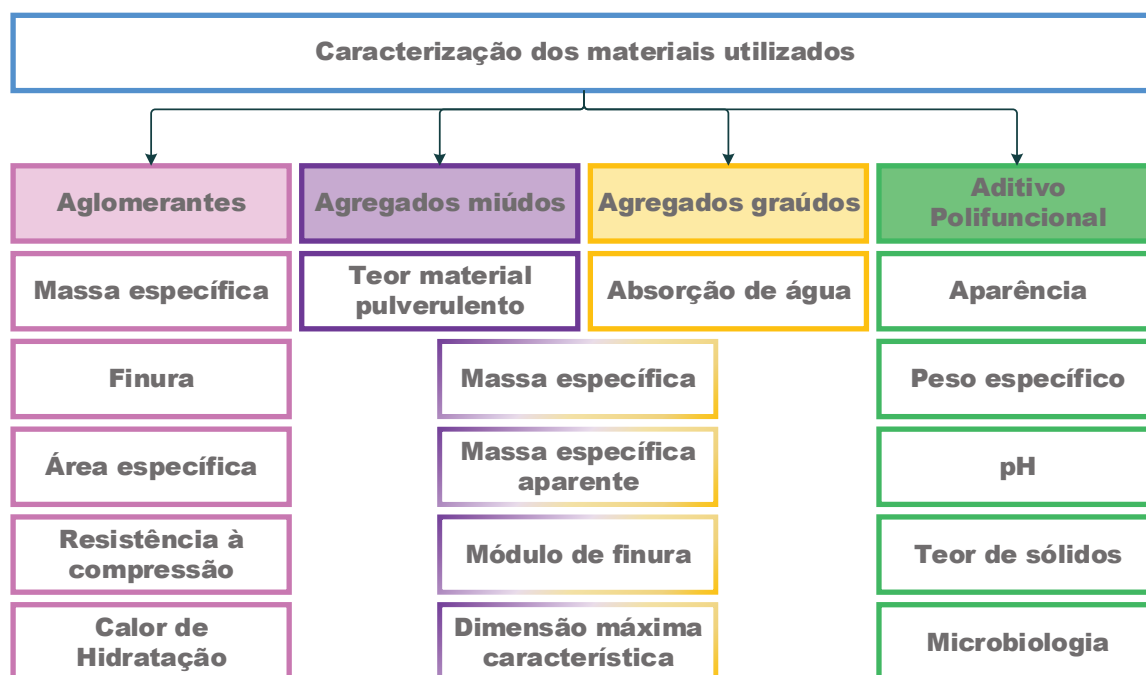
A parte de análise do calor de hidratação com relação a diferentes consumos de cimento foi realizada utilizando 2 consumos distintos de um mesmo cimento. O cimento que foi fixado na elaboração dos traços foi o cimento Portland CP V - ARI, por ser um cimento com maior liberação de calor e, portanto, com um resultado mais potencializado. Para o estudo da variação foram estudados concretos com consumos de  $350 \text{ kg/m}^3$  e  $500 \text{ kg/m}^3$ .

Para os concretos ensaiados com consumos de cimento diferentes, o traço teve que sofrer adequações quanto as proporções de agregados necessárias.

## 3.1.2. Materiais empregados

Para confeccionar os concretos utilizados este trabalho utilizou cimento, agregados graúdos e miúdos disponíveis na região de Goiânia, Estado de Goiás. A especificação dos materiais empregados e dos ensaios de caracterização realizados encontra-se nos subitens a seguir e na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Fluxograma dos ensaios de caracterização realizados dos materiais empregados na pesquisa.



### 3.1.2.1. Aglomerantes

Para a realização desse trabalho foram utilizados um cimento Portland CP II F – 40, um cimento Portland CP IV e um cimento Portland CP V – ARI, disponíveis e utilizados na região de Goiânia. O cimento Portland CP II F – 40 e o CP V – ARI, são fabricados pela Intercement localizada em Cezarina, Goiás e o cimento Portland CP IV-32 é fabricado pela Ciplan localizada em Sobradinho, Distrito Federal.

A caracterização física e mecânica de cada cimento está descrito na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Caracterização física e mecânica dos cimentos empregados na pesquisa.

Propriedades e ensaios		Método de ensaio	CP II	CP IV	CP V
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )		NBR NM 23 (2001)	3,05	3,01	3,05
Finura	Resíduo na peneira 200 (75mm)	NBR 11579 (2012)	0,33	1,11	0,05
	Área específica – Blaine (cm <sup>2</sup> /m)	NBR 16372 (2015)	5090	5742	4980
Tempo de	Início de pega	NBR NM 65	02:20	03:30	02:10

<b>Pega (h:min)</b>	(h:min)	(2003)			
	Fim de pega (h:min)		03:00	05:30	03:40
<b>Água de consistência – Pasta</b>		NBR NM 43 (2003)	30,8	33,6	31,2
<b>Resistência à Compressão (MPa)</b>	3 dias	NBR 7215 (1997)	32,8	21,2	38,9
	7 dias		41,1	31,3	48,9
	28 dias		49,6	40,5	53,8

Também foi realizada a caracterização química do cimento Portland, pela técnica de espectroscopia por fluorescência de raios X (FRX). O resultado da análise química está apresentado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Caracterização química dos cimentos empregados na pesquisa.

<b>Propriedades e ensaios</b>		<b>Método de ensaio</b>	<b>CP II</b>	<b>CP IV</b>	<b>CP V</b>
<b>Componentes químicos (%)</b>	Perda ao fogo	NBR NM 18 (2012)	4,85	4,73	4,37
	Resíduo insolúvel	NBR NM 15 (2012)	1,34	26,54	0,92
	Trióxido de enxofre (SO <sub>3</sub> )	Procedimento FURNAS n. 1.02.135 (fluorescência de raios X)	2,87	3,16	3,13
	Óxido de magnésio (MgO)		0,85	4,11	0,75
	Dióxido de silício (SiO <sub>2</sub> )		19,23	25,83	18,73
	Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )		4,70	7,78	5,24
	Óxido de ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )		2,63	2,80	3,09
	Óxido de cálcio (CaO)		64,47	48,66	64,07
	Óxido de cálcio livre (CaO)		2,44	5,37	2,89

R. H. Bogue publicou em 1929 um estudo em que desenvolveu um método para obtenção da composição das fases do clínquer estimada estequiometricamente a partir de análises químicas e com base nos resultados apresentados na Tabela 3.2, utilizou-se as Equações 3.1 a 3.4, propostas por Bogue, para se calcular os percentuais aproximados dos compostos dos cimentos CP II e CP V, não se aplicando ao cimento CP IV, pois o estudo de Bogue se

restringe a cimentos na forma pura e mesmo o cimento CP II apresentando adição de filler, o valor encontrado não se distancia de maneira considerável. Como forma comparativa, foi solicitada também aos fabricantes a composição química do clínquer utilizado na fabricação de cada um dos cimentos analisados e está apresentado juntamente na Tabela 3.3.

$$\%C_3S = 4,0710.CaO - 7,6024.SiO_2 - 6,7187.Al_2O_3 - 1,4297.Fe_2O_3 - 2,850.SO_3 \quad (3.1)$$

$$\%C_2S = 2,8675.SiO_2 - 0,7544.\%C_3S \quad (3.2)$$

$$\%C_3A = 2,6504.Al_2O_3 - 1,6920.Fe_2O_3 \quad (3.3)$$

$$\%C_4AF = 3,0432.Fe_2O_3 \quad (3.4)$$

Como essa pesquisa investiga a variação de calor liberado por cada tipo de cimento, é importante o conhecimento da quantidade de cada um desses compostos que apresentam características exotérmicas isoladas, evidenciando essa variação. Com o intuito de analisar essa variação, também foram realizados ensaios de calor de hidratação pela Garrafa de Langavant, segundo NBR 12006 (1990), e de calorimetria por meio de calorímetro semi-adiabático, ambos apresentados na Figura 3.4. Na Tabela 3.3 é apresentado a composição potencial de Bogue, assim como os resultados dos ensaios e na Figura 3.5 é apresentado o gráfico gerado pelo calorímetro.

Figura 3.4 – (a) Ensaio de calor de hidratação pela Garrafa de Langavant. (b) Ensaio de calorimetria

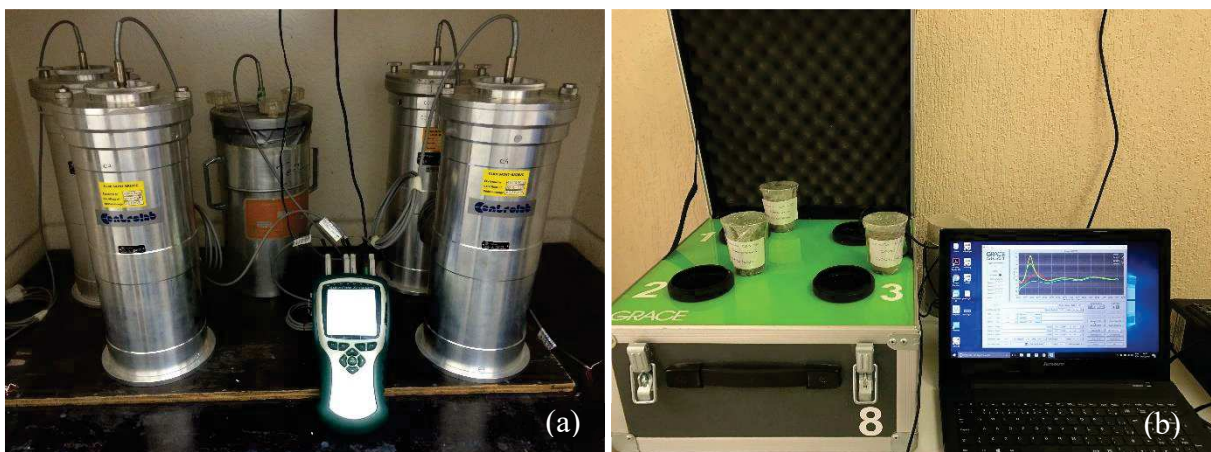
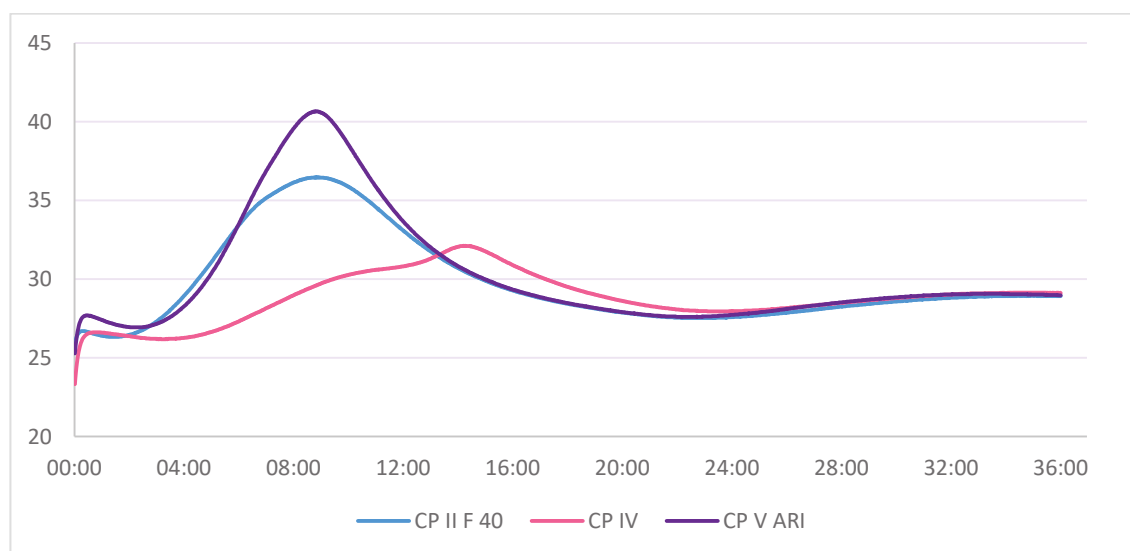


Tabela 3.3 – Composição química e resultados de calor de hidratação dos cimentos empregados na pesquisa.

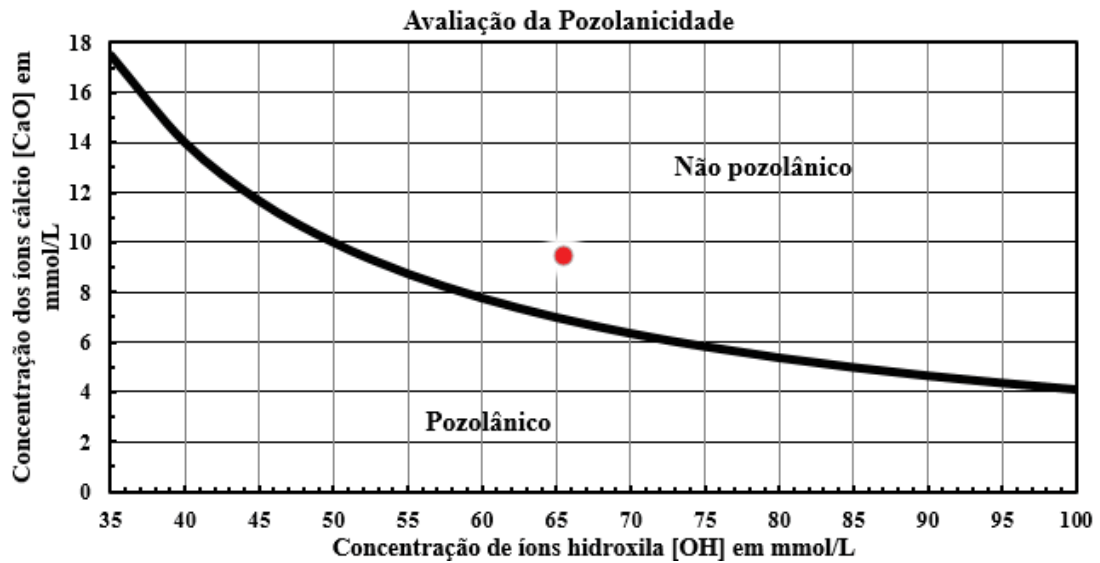
Propriedades e ensaios		Método de ensaio	CP II		CP IV		CP V	
Composto anidro do clínquer	C <sub>3</sub> S (%)	Equação de Bogue e Fabricante	Bogue	Fábrica	Bogue	Fábrica	Bogue	Fábrica
	C <sub>2</sub> S (%)		71,0	61,5	-	60,6	67,0	61,5
	C <sub>3</sub> A (%)		1,6	14,0	-	11,1	3,1	14,0
	C <sub>4</sub> AF (%)		8,0	8,8	-	8,0	8,7	8,8
Calor de hidratação (J/g)	Garrafa de Langavant	3 dias	358,6		294,0		406,9	
		7 dias	377,5		330,9		424,1	
Temperatura máxima (°C)		Calorímetro	36,5		32,1		40,7	

Figura 3.5 – Desenvolvimento de temperatura apresentado pelo calorímetro, para cada tipo de cimento.



Com o intuito de se analisar o índice de pozolanicidade do cimento CP IV utilizado na pesquisa, foi realizado também o ensaio de Fratini de acordo com a NBR 5753 (ABNT, 2016) que define que a pozolanicidade é estimada por comparação entre a concentração de íon cálcio, expressa como óxido de cálcio, presente em solução aquosa em contato com o cimento hidratado, após um período de tempo fixado, e a quantidade de íon cálcio capaz de saturar uma solução de mesma alcalinidade. Na Figura 3.6 é apresentado o gráfico gerado com o ensaio realizado, e por meio de sua análise, é possível observar que o cimento analisado não satisfaz o ensaio de pozolanicidade, pois sua concentração de íon cálcio na solução é maior do que a curva da concentração saturada.

Figura 3.6 – Ensaio de pozolanicidade do cimento CP IV.



### 3.1.2.2. Agregados

Como agregados foram utilizados dois tipos de agregado miúdo, bem como dois tipos de agregado graúdo, para um melhor ajuste da composição granulométrica. Os agregados graúdos usados na produção do concreto foram brita 0 e brita 1 que são provenientes de rocha britada do tipo litológico granito e estão apresentados na Figura 3.7. Na Tabela 3.4 são apresentados os resultados de caracterização dos agregados graúdos

Figura 3.7 – Agregados graúdos empregados no concreto da pesquisa.

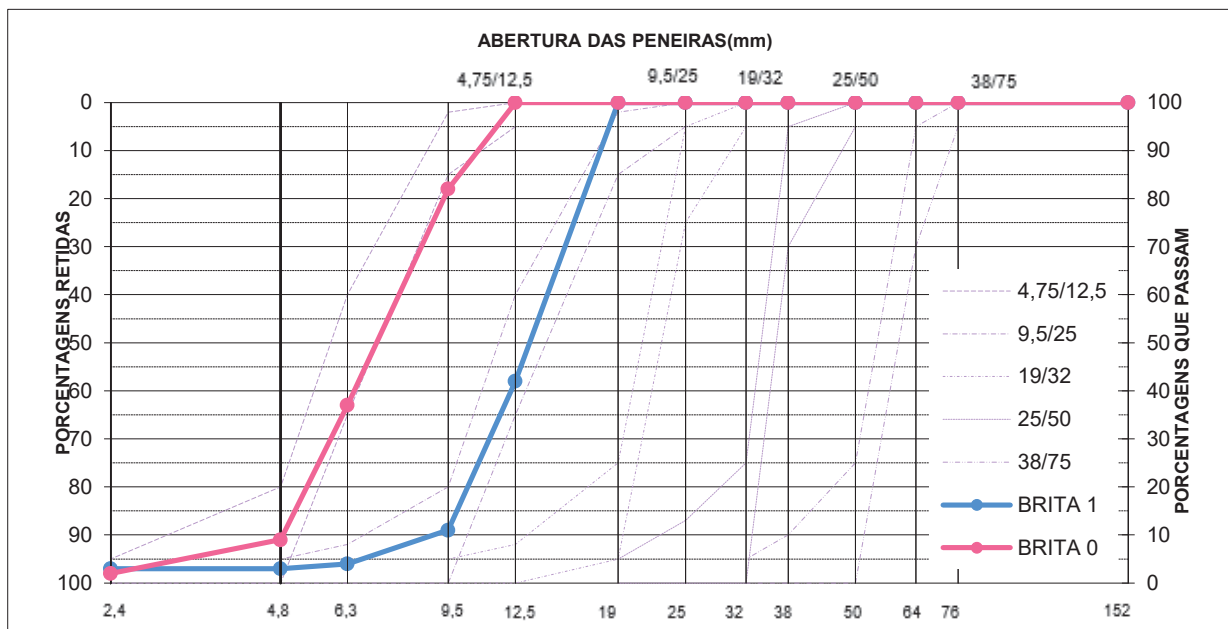


Tabela 3.4 – Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados graúdos utilizados na pesquisa.

Propriedades e ensaios		Método de ensaio	Brita 0	Brita 1
<b>Composição granulométrica</b>	Zona Granulométrica	NBR NM 248 (2003)	4,75/12,5	9,5/25
	Dimensão máxima característica		12,5 mm	19 mm
	Módulo de finura		6,04	6,86
<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>		NBR NM 53 (2009)	2,65	2,66
<b>Massa específica aparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>			2,61	2,62
<b>Absorção de água (%)</b>			0,5	0,5

Na Figura 3.8 estão apresentadas as curvas granulométricas dos agregados graúdos utilizados na composição dos concretos da pesquisa.

Figura 3.8 – Curvas de Distribuição Granulométrica dos agregados graúdos empregados (Brita 0 e Brita 1).



Quanto aos agregados miúdos usados para a fabricação do concreto, foi feita uma composição entre areia natural de rio e areia artificial, apresentadas na Figura 3.9 e os resultados do ensaio caracterização desses agregados estão contidos na Tabela 3.5.

Figura 3.9 – Agregados miúdos empregados no concreto da pesquisa.

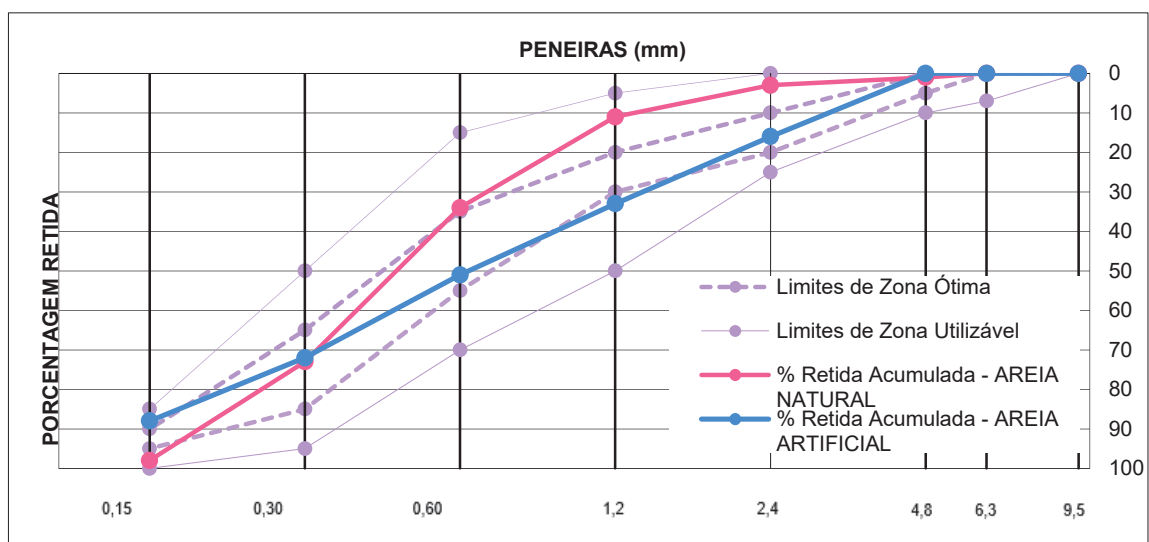


Tabela 3.5 – Ensaio de caracterização dos agregados miúdos utilizados no programa experimental.

Propriedades e ensaios		Método de ensaio	Natural	Artificial
<b>Composição granulométrica</b>	Zona granulométrica	NBR NM 248 (2003)	Utilizável superior	Ótima inferior
	Dimensão máxima característica		2,34	4,75
	Módulo de finura		2,18	2,60
<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>		NBR NM 52 (2009)	2,64	2,71
<b>Massa específica aparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>			2,61	2,71
<b>Teor de material pulverulento (%)</b>		NBR NM 46 (2003)	2,10	2,90

Na Figura 3.10 estão apresentadas as curvas granulométricas dos agregados miúdos utilizados na composição dos concretos da pesquisa.

Figura 3.10 – Curvas de Distribuição Granulométrica dos agregados miúdos empregados (Areia Natural e Areia Artificial).



### 3.1.2.3. Aditivo

Em todos os concretos foi utilizado aditivo plastificante polifuncional, apresentado na Figura 3.11, que atualmente é o tipo de aditivo mais utilizado nas centrais dosadoras de concreto da região de Goiânia para melhorar a trabalhabilidade do concreto e reduzir água. O aditivo empregado é produzido na fábrica da *Grace Construction*, localizada em Duque de Caxias e as características do mesmo foram fornecidas pela fábrica e estão na Tabela 3.6.

Figura 3.11 – Aditivo polifuncional empregado no concreto da pesquisa.



Tabela 3.6 – Características do aditivo polifuncional empregado no concreto da pesquisa.

Ensaio	Especificação	Valor obtido
<b>Aparência</b>	Líquido marrom escuro	Conforme
<b>Peso específico (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,13 – 1,19	1,15
<b>pH a 25°C</b>	7,50 – 9,50	8,57
<b>Teor de sólidos (%)</b>	32,87 – 36,33	35,68
<b>Microbiologia</b>	Isento	Conforme

### 3.1.2.4. Concreto

Os concretos estudados tiveram o proporcionamento dos materiais definido em estudo de dosagem, em que se adota o método utilizado por Furnas Centrais Elétricas S.A., também conhecido como método do Módulo de Finura, que se fundamenta no desenvolvimento experimental de diversas combinações entre os agregados (alterando o módulo de finura da mistura), de forma a minimizar o consumo de cimento sem prejuízo da resistência mecânica e da trabalhabilidade do concreto.

Por meio desse método chegou-se à conclusão que para um melhor empacotamento do concreto, devia-se utilizar os agregados graúdos na proporção de 60% brita 1 e 40% brita 0 e os agregados miúdos na proporção de 80% areia artificial e 20% areia natural.

De posse desses resultados, a próxima etapa do trabalho foi a realização do estudo de dosagem que foi feito com o cimento CP II F-40 para se chegar ao traço que deveria ser usado na concretagem dos blocos. Na Figura 3.12 são vistas fotos do momento da realização do estudo e os resultados estão apresentados na Tabela 3.7.

Figura 3.12 – Fotos do estudo de dosagem sendo realizado.

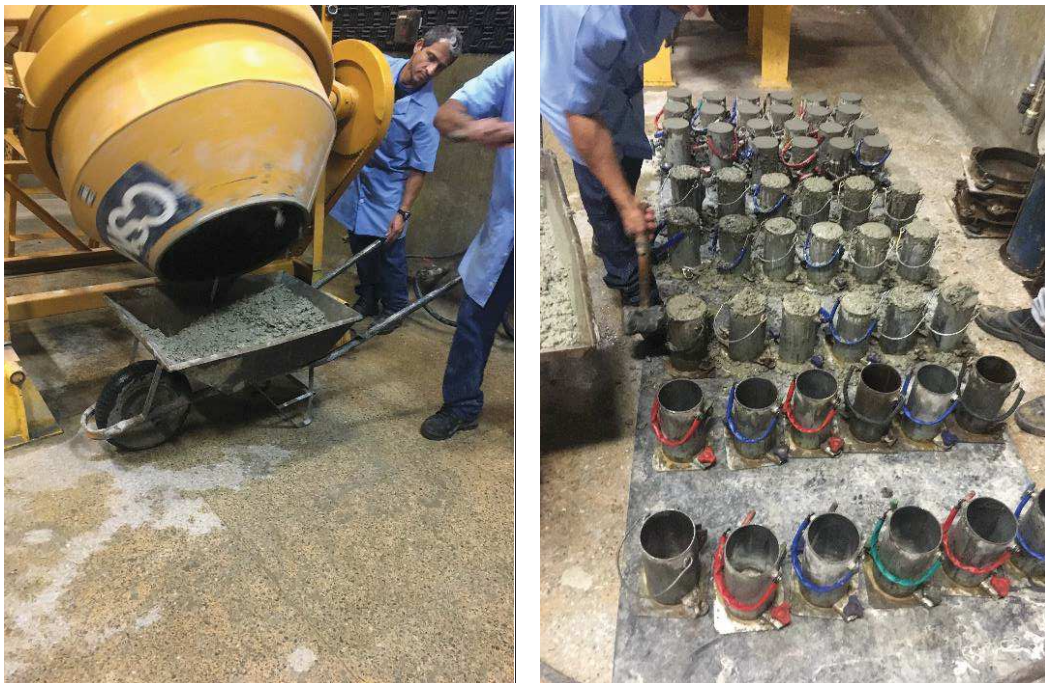


Tabela 3.7 – Traços desenvolvidos no estudo de dosagem.

Relação traços experimentais		E-16664	E-16665	E-16666	E-16667	E-16668
Composição do traço	Cimento	175	210	268	359	533
	Água	178	177	179	186	205
	Areia Natural	173	166	159	142	105
	Areia Artificial	692	665	635	567	420
	Brita 0	423	423	432	434	430
	Brita 1	634	635	647	652	645
	Aditivo Polifuncional	1,311	1,574	2,007	2,693	3,998

<b>Propriedades no estado fresco e endurecido</b>	a/c	1,02	0,84	0,67	0,52	0,38
	Teor de argamassa (%)	49,6	49,6	49,6	49,6	49,6
	Módulo de finura	4,725	4,765	4,829	4,946	5,215
	Abatimento (mm)	100	100	100	100	100
	Ar incorporado (%)	4,4	4,8	3,8	3,0	2,5
	Massa unitária (kg/m <sup>3</sup> )	2275	2277	2324	2345	2341
	Resistências (MPa)	3 dias	12,1	15,9	23,8	34,3
7 dias		13,7	16,5	25,2	38,5	38,9
28 dias		14,3	21,2	30,0	42,9	55,1

\* Valor expurgado por comparação com os demais resultados da amostra

Feito o estudo de dosagem, ficou determinado que o concreto usado para a concretagem dos protótipos de blocos seria o que está apresentado na Tabela 3.8.

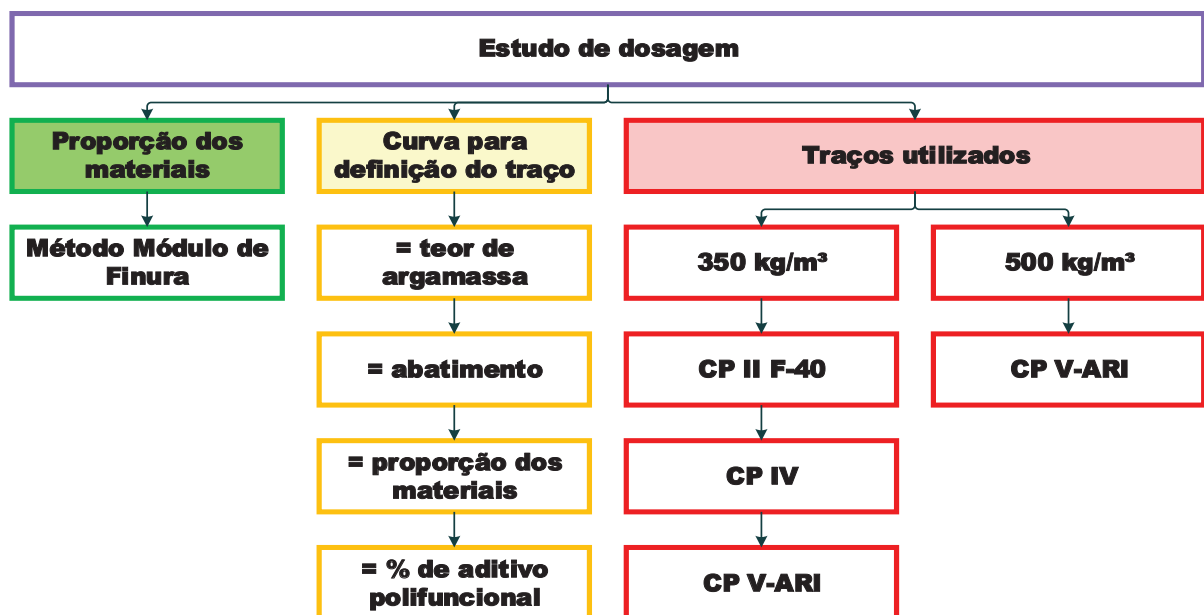
Tabela 3.8 – Traços rodados em Central dosadora de Concreto para concretagem dos blocos.

<b>Relação traços experimentais</b>		<b>E-16669</b>	<b>E-16670</b>	<b>E-16671</b>	<b>E-16672</b>	
<b>Tipo de cimento</b>		CP II F-40	CP IV	CP V-ARI	CP V-ARI	
<b>Composição do traço</b>	Cimento	350	350	350	500	
	Água	166	187	160	176	
	Areia Natural	145	145	145	118	
	Areia Artificial	580	580	580	472	
	Brita 0	435	435	435	336	
	Brita 1	670	670	670	7,84	
	Aditivo Polifuncional	2,622	2,622	2,622	3,75	
<b>Propriedades no estado fresco e endurecido</b>	a/c	0,47	0,53	0,46	0,35	
	Teor de argamassa (%)	49,3	49,3	49,3	49,3	
	Abatimento (mm)	100	100	100	100	
	Temperatura de lançamento (°C)	38,0	37,0	38,0	40,0	
	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	2385	2407	2380	2399	
	Resistências (MPa)	1 dia	14,9	11,0	19,1	35,8
		3 dias	24,1	15,8	23,8	41,3
		7 dias	32,5	20,2	27,5	45,4
14 dias		34,5	22,0	34,3	48,1	
28 dias		36,4	26,0	41,1	51,6	

Módulo de elasticidade (GPa)	28 dias	26,0	18,5	22,9	29,3
Resistência à tração diametral (MPa)	28 dias	2,52	2,13	2,24	3,21
Resistência à tração na flexão (MPa)	28 dias	3,75	2,87	3,35	4,80
Resistência à tração direta (MPa)	28 dias	1,63	1,31	1,48	2,12

Em todos os traços dos estudos, foi mantido o teor de argamassa seca igual a 49,3%, abatimento de 100 mm, o mesmo proporcionamento de materiais e o percentual de aditivo polifuncional igual a 0,75% sobre a massa de cimento. A diferenciação entre eles foi apenas com relação aos tipos de cimento, quando essa foi a comparação, e a quantidade de cimento em relação a quantidade de agregados secos totais, quando se comparou concretos com consumos de cimentos distintos. Na Figura 3.13, é apresentado um fluxograma com os parâmetros de dosagem e as variáveis estudadas na pesquisa

Figura 3.13 – Fluxograma dos parâmetros de dosagem e variáveis estudadas na pesquisa.



Para o ensaio das propriedades térmicas foi realizado o ensaio de difusividade térmica, que varia de acordo com o tipo de agregado, portanto o ensaio foi realizado em apenas uma amostra, pois todos os concretos são constituídos do mesmo agregado e também o ensaio de elevação adiabática, realizado em todos os concretos com cimentos distintos. Na Tabela 3.9 estão os valores das propriedades térmicas utilizadas no trabalho, nas Figuras 3.14 e 3.15 é

possível ver, respectivamente, a aparelhagem para o ensaio de difusividade e o gráfico gerado pelo ensaio.

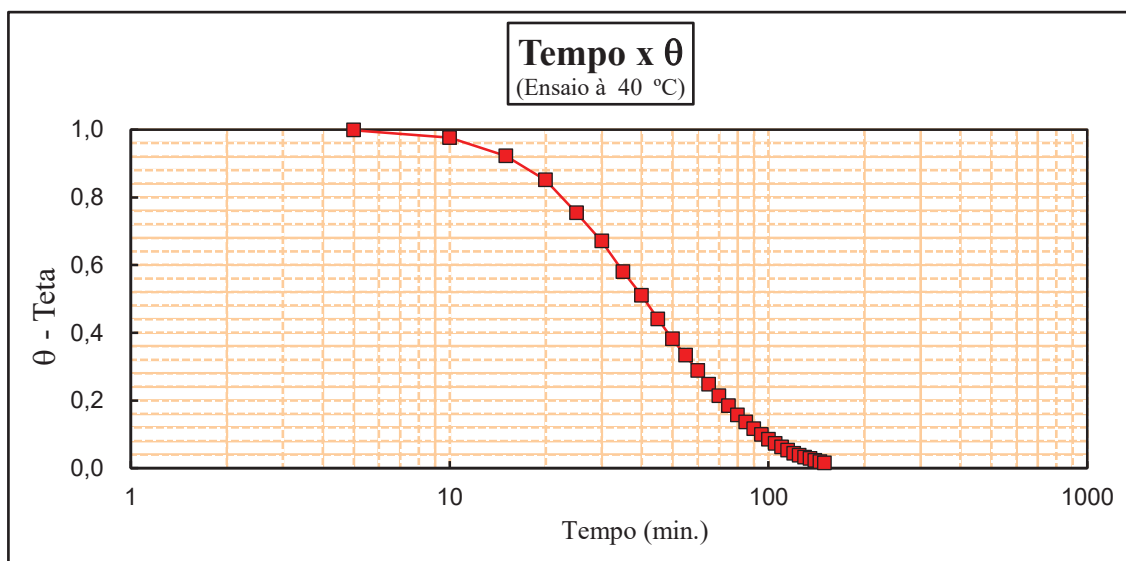
Tabela 3.9 – Propriedades térmicas do concreto utilizado para concretagem dos blocos.

Propriedades térmicas	Valor adotado
Calor específico (cal/g.°C)	0,224
Condutividade térmica (J/m.s.K)	2,783
Difusividade térmica (m <sup>2</sup> /dia)	0,071

Figura 3.14 – Aparelhagem do ensaio de difusividade térmica realizado na pesquisa.



Figura 3.15 – Gráfico gerado pelo ensaio de difusividade.

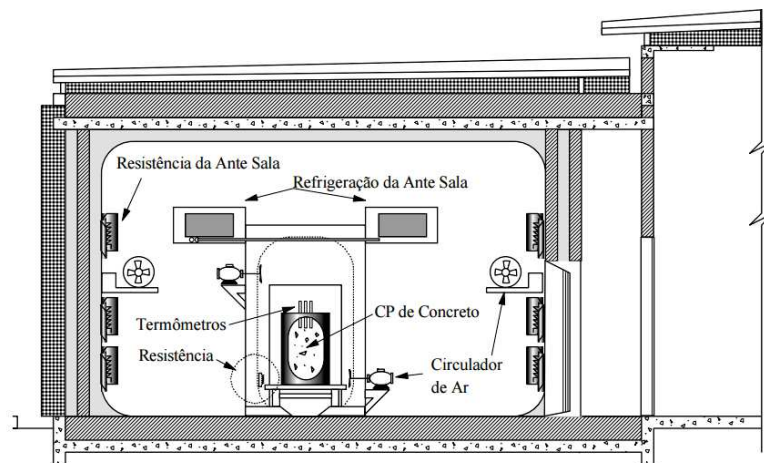


O ensaio de elevação adiabática de temperatura é realizado em um calorímetro adiabático, aparelho capaz de medir a elevação da temperatura do concreto sem troca de calor com o

ambiente. Os ensaios aos quais se referem esta pesquisa foram realizados no calorímetro adiabático do Laboratório de Concreto do DCT.T de Furnas.

O calorímetro do Laboratório de Concreto de Furnas se constitui de uma câmara interna a uma antessala, construída com dupla parede de alvenaria, com uma camada intermediária de lã de rocha como material isolante térmico, onde será inserido o corpo de prova a ser ensaiado, conforme a Figura 3.16.

Figura 3.16 – Calorímetro adiabático – Antessala – Corte Longitudinal (FURNAS, 1997).



No teto e no piso da antessala são empregados concretos especiais com baixa difusividade térmica. O calorímetro possui paredes, piso e teto de madeira, com encaixe do tipo “macho-fêmea”, em duas camadas intercaladas com manta de lã de rocha de 10cm de espessura. As portas, tanto da sala como do calorímetro, são do tipo frigorífico, conforme Figura 3.17. Essas câmaras contêm ar em seu interior.

Figura 3.17 – (a) Vista geral da antessala. (b) Corpo de prova dentro do calorímetro



A elevação adiabática de temperatura do concreto pode ser determinada também por meio da correlação de propriedades térmicas dos materiais que o compõem e de propriedades do próprio concreto, de acordo com a Equação 3.5.

$$\Delta\theta = \frac{Ca.H}{c.\gamma} \quad (3.5)$$

Em que:

$\Delta\theta$  = elevação adiabática de temperatura (°C);

Ca = consumo de aglomerante (kg/m<sup>3</sup>);

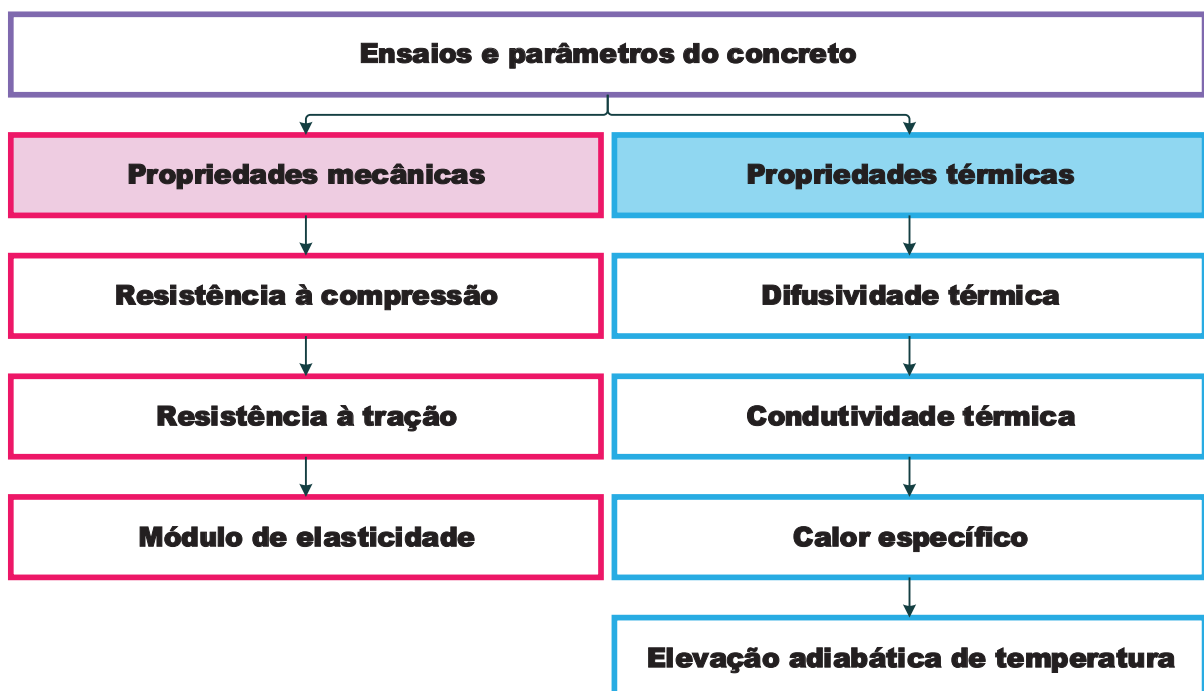
c = calor específico do concreto (J/g);

$\gamma$  = massa específico do concreto (kg/m<sup>3</sup>);

H = calor de hidratação do aglomerante (J/g).

Observa-se na Figura 3.18, um fluxograma com a relação de ensaios realizados nos concretos estudados na pesquisa e os parâmetros necessários para a realização das análises propostas pela pesquisa.

Figura 3.18 – Fluxograma dos ensaios e parâmetros dos concretos analisados na pesquisa.

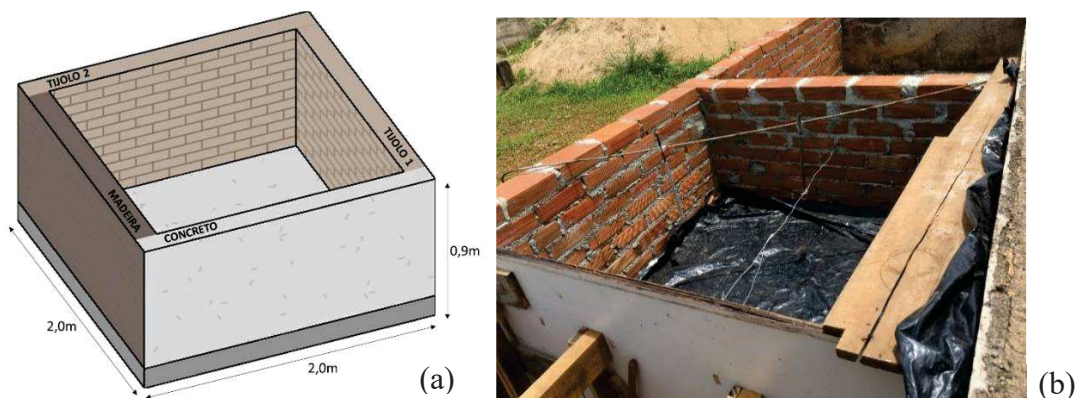


### 3.1.3. Método

#### 3.1.3.1. Protótipo e bloco de fundação de obra em Goiânia

Após a realização de todas as caracterizações dos materiais componentes dos concretos estudados e desenvolvidos os traços de concreto, foram concretados os protótipos de bloco de fundação com as dimensões de 2x2x0,9 metros. Pela dificuldade de se fazer uma estrutura de fôrmas resistente para suportar o volume de concreto dos blocos e buscando aproveitar uma estrutura de concreto já existente no local que seria concretado, foram feitos dois lados de alvenaria, um lado de madeira, que seria móvel a medida que se concretassem os blocos, e o outro lado de concreto (estrutura já presente), conforme a Figura 3.19.

Figura 3.19 – (a) Representação do protótipo de bloco usado para a realização do estudo. (b) Modelo original do bloco concretado na pesquisa

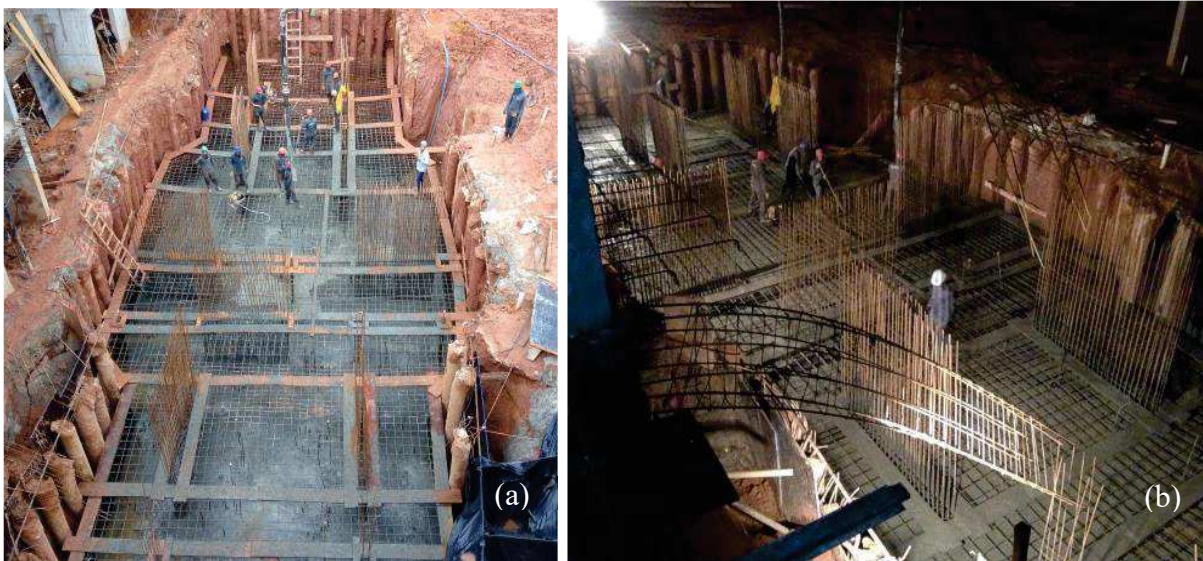


Como forma de validação do modelo proposto pela pesquisa, foi também monitorado em campo um bloco de fundação localizado na região de Goiânia para posterior análise térmica e de tensão. O bloco analisado faz parte da Torre A de um empreendimento residencial localizado na região do Setor Jardim Atlântico em Goiânia, que possui 18 andares e é composto por 3 torres. Na Figura 3.20 é apresentado o empreendimento e na Figura 3.21 observam-se fotos do bloco concretado.

Figura 3.20 – As três torres do empreendimento, com destaque para a Torre A, objeto de análise.

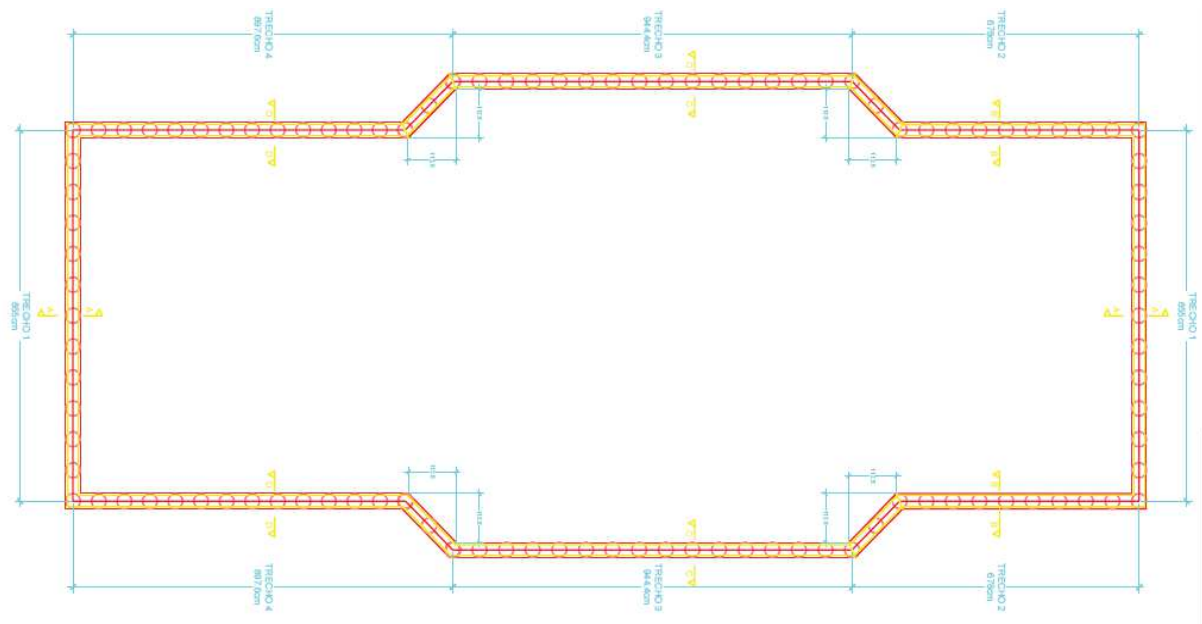


Figura 3.21 – (a) Foto do início da concretagem do bloco; (b) Foto do final da concretagem.



O bloco de fundação analisado, foi concretado em apenas uma camada de altura de 2 metros, apresentando um volume aproximado de 500 m<sup>3</sup>, conforme a Figura 3.22, na qual se tem a projeção em planta do bloco, com suas dimensões. A concretagem se iniciou por volta de 16 horas e finalizou por volta de 3 horas da madrugada do dia seguinte.

Figura 3.22 – Projecção e planta com dimensões do bloco analisado.



O concreto utilizado no bloco está apresentado na Tabela 3.10, em que pode-se observar o uso de cimento CP II F - 40, sílica ativa e gelo, para reduzir a temperatura de lançamento do concreto, controlando, dessa forma, a elevação de temperatura no bloco, com vistas a evitar o aparecimento de fissuras térmicas.

Para se calcular o consumo de cimento equivalente no traço, de modo a poder utilizar esse dado no modelo de previsão proposto, foi necessário utilizar a Equação 3.6.

$$C_{eq} = mcim + \frac{\gamma_c \cdot mad}{\gamma_{ad}} \quad (3.6)$$

Em que

$C_{eq}$  = Cimento Equivalente ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$mcim$  = Massa de cimento (kg);

$mad$  = Massa de adição (kg);

$\gamma_c$  = Massa específica do cimento ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$\gamma_{ad}$  = Massa específica da adição ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

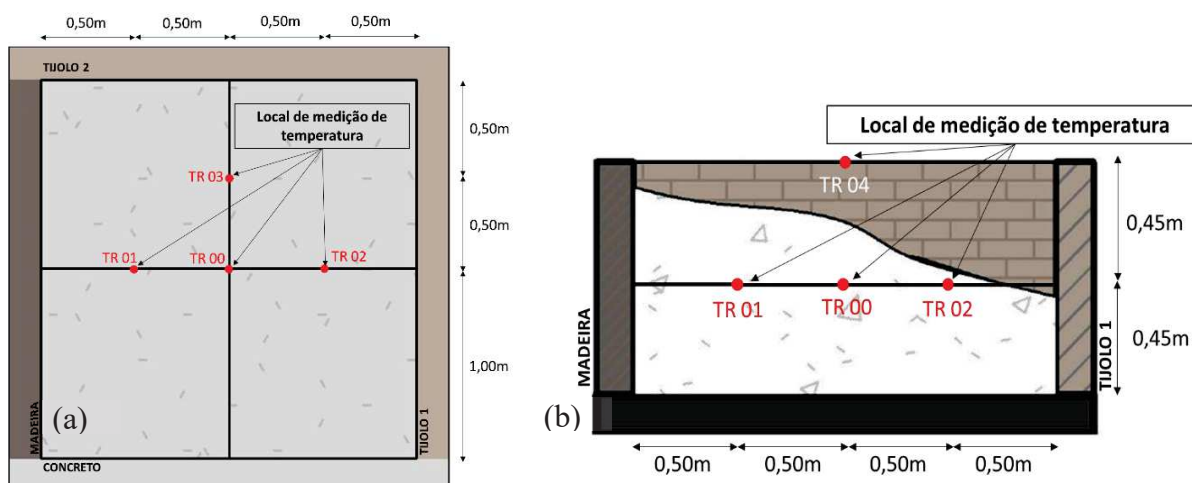
Tabela 3.10 – Traço de concreto utilizado para a concretagem do bloco.

Traço		fck 40 brita 0 e 1 slump 10±2
<b>Tipo de cimento</b>		CP II F-40
<b>Consumo de materiais</b>	Cimento	310 kg/m <sup>3</sup>
	Sílica ativa	20 kg/m <sup>3</sup>
	<b>Consumo equivalente</b>	<b>338 kg/m<sup>3</sup></b>
	Brita 1	715 kg/m <sup>3</sup>
	Brita 0	315 kg/m <sup>3</sup>
	Areia Natural	395 kg/m <sup>3</sup>
	Areia Artificial	395 kg/m <sup>3</sup>
	Água	118 l/m <sup>3</sup>
	Gelo	80 l/m <sup>3</sup>
	Aditivo Polifuncional	2,64 kg/m <sup>3</sup>

### 3.1.3.2. Monitoramento da temperatura no protótipo e no bloco em campo

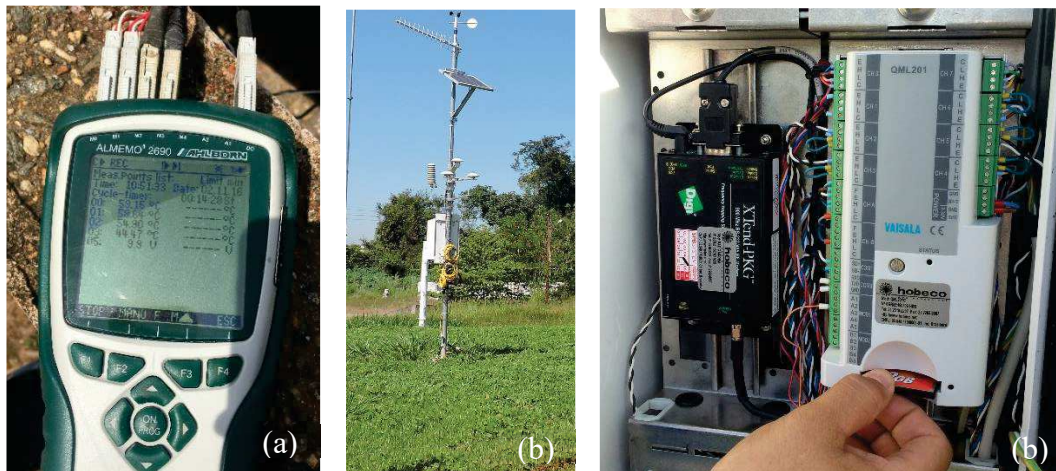
Os protótipo dos blocos de fundação tiveram suas temperaturas monitoradas com sensores de temperatura (Almemo PT-100) de alta precisão e excelente repetibilidade de leitura, localizados no interior do bloco, conforme a Figura 3.23.

Figura 3.23 – Localização dos termopares utilizados para o monitoramento da temperatura nos blocos. (a) Vista superior. (b) Corte



Todas as leituras de temperaturas dos protótipos concretados foram gravadas no aparelho Almemo PT-100 e as temperaturas ambientes foram coletadas por meio da estação em Furnas, observado na Figura 3.24.

Figura 3.24 – Monitoramento de temperatura. (a) Aparelho utilizado nas leituras das temperaturas dos blocos. (b) Estação para coleta de temperaturas ambientes.



O monitoramento de temperatura no bloco de fundação em campo, foi realizado por meio de termopares instalados no centro do bloco analisado, conforme visto na Figura 3.25 e a leitura foi programada para ser realizada em períodos de 1 hora durante 86 horas.

Figura 3.25 – Termopar instalado no bloco de fundação da obra monitorada



### 3.1.3.3. Modelo de previsão de temperatura e tensão

O modelo de previsão proposto pela pesquisa foi desenvolvido no programa Microsoft Excel com base em um modelo apresentado e utilizado por Gambale (2015) para avaliação de temperatura máxima e tensão em concretos de características massivas, e apresenta a interface apresentada na Figura 3.26, em que são colocados todos os dados de entradas necessários para a análise, sendo de grande importância se ter o conhecimento das propriedades físicas,

mecânicas e térmicas do concreto analisado e apresentado o resultado final de temperatura máxima e se haverá probabilidade de fissuração.

Figura 3.26 – Interface do modelo de previsão.

ENTRADA DE DADOS					
<b>PROPRIEDADES TÉRMICAS</b>		<b>unid.</b>	<b>FUNDAÇÃO</b>	<b>CONCRETO</b>	
Calor Específico C	Kcal/Kg°C	0,24	0,24		
Massa Específica	Kg/m³	2400	2450		
Condutividade Térmica	Kcal/m.d.°C	64,56	64,56		
Difusividade Térmica	Kcal/m.d.°C	<b>0,112</b>	0,100		
<b>PROPRIEDADES</b>		<b>unid.</b>	<b>fórmula</b>	<b>a</b>	<b>b</b>
Coefficiente de Fluência	1/10-6 MPa	Fk=a+b/t	5,9900	6,3100	
Módulo de Elasticidade	GPa	Ec=t/(a+bt)	0,0374	0,0359	
Tração na flexão	MPa	tf=t/(a+bt)	0,7284	0,2140	
Tração direta	MPa	td=t/(a+bt)	1,2140	0,3567	
Coefficiente de dilatação	10 <sup>-6</sup>		9	---	
Coefficiente de segurança			1	---	
Coefficiente de transmissão concreto-ar	Kcal/m².d.°C		30		
<b>ELEVAÇÃO ADIABÁTICA DE TEMPERATURA (Ea)</b>	<b>a</b>	0,0027	<b>ENSAIO</b>		
	<b>b</b>	0,0215	0,5 dia	36,4 °C	
	<b>28 dias</b>	<b>46,3 °C</b>	28 dias	46,0 °C	
	<b>coef. =</b>	<b>0,13</b>	<b>coef. =</b>	<b>0,13</b>	
ajuste de adiabática =	<b>0,0024</b>	<b>0,0190</b>			
Pretendo um coeficiente =		0,15			
<b>INFORMAÇÕES GERAIS</b>					
<b>ESPESSURA DA CAMADA</b>	CONCRETO (m)	0,9			
	FUNDAÇÃO (m)	2			
<b>ELEMENTOS FINITOS</b>	CONCRETO (m)	<b>0,09</b>			
	FUNDAÇÃO (m)	<b>0,2</b>			
<b>CONSUMO DE CIMENTO</b>	kg/m³	350			
<b>TEMPERATURA DE COLOCAÇÃO</b>	°C	35			
<b>TEMPERATURA DA FUNDAÇÃO</b>	°C	30			
<b>TEMPERATURA DO AR (MÍN e MÁX)</b>		18,82 °C	32,13 °C		
<b>ACRÉSCIMO DE TEMPO</b>	dia	0,5			
<b>INÍCIO DA CONCRETAGEM</b>	horas	0			
<b>CÁLCULO DA TENSÃO</b>					
Multiplicador	(ACI)	1,00			
Coefficiente de restrição	(MEHTA, 2008)	1,00			
<b>TEMP. MÁXIMA (°C)</b>	<b>71,9 °C</b>				
<b>Probabilidade de fissuração térmica</b>	Flexão	<b>NÃO</b>			
	Direta	<b>SIM</b>			

O problema da condução térmica de calor consiste na resolução numérica da equação de propagação de calor em um meio sólido, deduzida pela Lei de Fourier e no princípio de conservação de energia, conforme já exposto no capítulo de revisão bibliográfica.

O modelo de previsão proposto pela pesquisa considera a propagação unidirecional, com uma malha de elementos finitos em que se tem 21 nós e 20 elementos, considerando o concreto e uma fundação, sendo analisados em um período de 60 dias com um incremento de 0,5 dia para o cálculo.

Como já exposto no capítulo 2, a Equação 3.7, desenvolvida com base no trabalho de Lewis *et al.* (1996), é a utilizada para o cálculo das temperaturas no concreto. Por meio desse cálculo, é obtida a temperatura atingida em todos os nós no período de tempo calculado e então determinada a temperatura máxima atingida pelo concreto.

$$T(t + \Delta t) = [h^2 + C / \Delta t]^{-1} \cdot [W(t) + C.T(t) / \Delta t] \quad (3.7)$$

Em que:

T = Temperatura

[h<sup>2</sup>] = Matriz Difusividade Térmica;

[C] = Matriz Calor Específico;

$\Delta t$  = Incremento do tempo;

[W(t)] = Vetor Carga térmica.

A análise das tensões foi realizada através de um método numérico de resolução direta da Equação 3.8, levando em consideração o comportamento viscoelástico linear com envelhecimento do concreto, e com emprego do modelo logarítmico para descrever o efeito da fluência do concreto.

$$\varepsilon(t) = \int_{t_0}^t f(z, t-z) \cdot \sigma(t) \quad (t \geq z) \quad (3.8)$$

Em que

$\varepsilon(t)$  = deformação de origem térmica.

A resolução numérica da Equação 3.7 pode ser feita da seguinte maneira:

$$\varepsilon_j = \sum_{i=1}^j f_{ij} \cdot \Delta \sigma_i \quad (t \geq z) \quad (3.9)$$

Pode-se representar a Equação 3.9 na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \sigma_j \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

onde:

$\begin{bmatrix} \varepsilon_j \end{bmatrix}$  = vetor (n) de deformações de origem térmica =  $\alpha \cdot \delta T = \alpha \cdot (T_i - T_l)$ , em que  $\alpha$  é o coeficiente de dilatação do concreto;

$\begin{bmatrix} f_{ij} \end{bmatrix}$  = matriz (n, n) cujo elemento da linha j e da coluna i  $\geq j$  é a fluência do concreto na idade  $t_j$ , com nascimento na idade  $z_i$ . De uma maneira mais simplificada, pode-se dizer que a matriz  $f_{j,i}$  é triangular com a parte superior nula, cujas colunas são um ensaio de fluência com nascimento em  $z_i$ , onde a diagonal representa o início do ensaio da fluência, isto é  $f_{i,i} = 1/E(z_i)$ .

Para a determinação da tensão de origem térmica, basta isolar  $\Delta \sigma$  na idade  $t_j$  da seguinte maneira:

$$\begin{bmatrix} \Delta \sigma_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{ij} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_j \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

A superposição das tensões ( $\sigma$ ) conduz ao cálculo das tensões em qualquer tempo conforme Equação 3.12.

$$\sigma(t_n) = \sum_{j=1}^n \Delta\sigma_j \quad (3.12)$$

As evoluções das tensões comparadas com a evolução, no tempo, da resistência à tração do concreto, permitiram a análise da segurança contra a fissuração térmica e dessa forma é gerado um gráfico final, onde se analisa a ocorrência de fissuras devido a tensão determinada pelo cálculo que, para o modelo proposto, é analisado em relação a tração de flexão e direta do concreto.

### 3.1.3.4. Programa *Ansys*

Para a comparação do modelo proposto pela pesquisa, utilizou-se o *software ANSYS* na versão 16.2, cuja interface é apresentada nas Figuras 3.27 e 3.28.

Figura 3.27 – Interface geral do *software Ansys*.

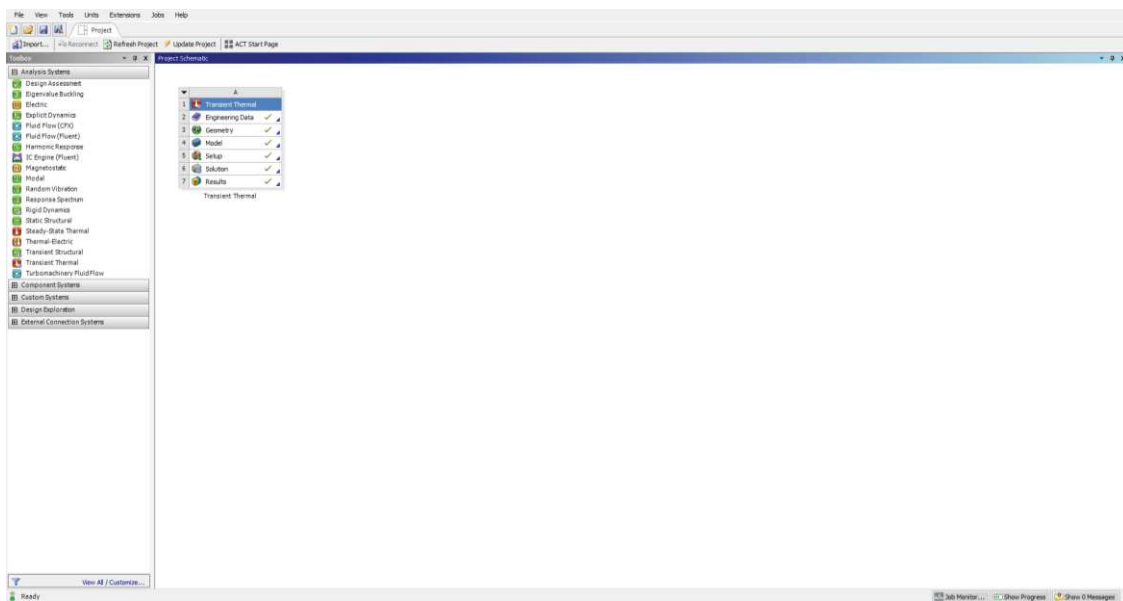
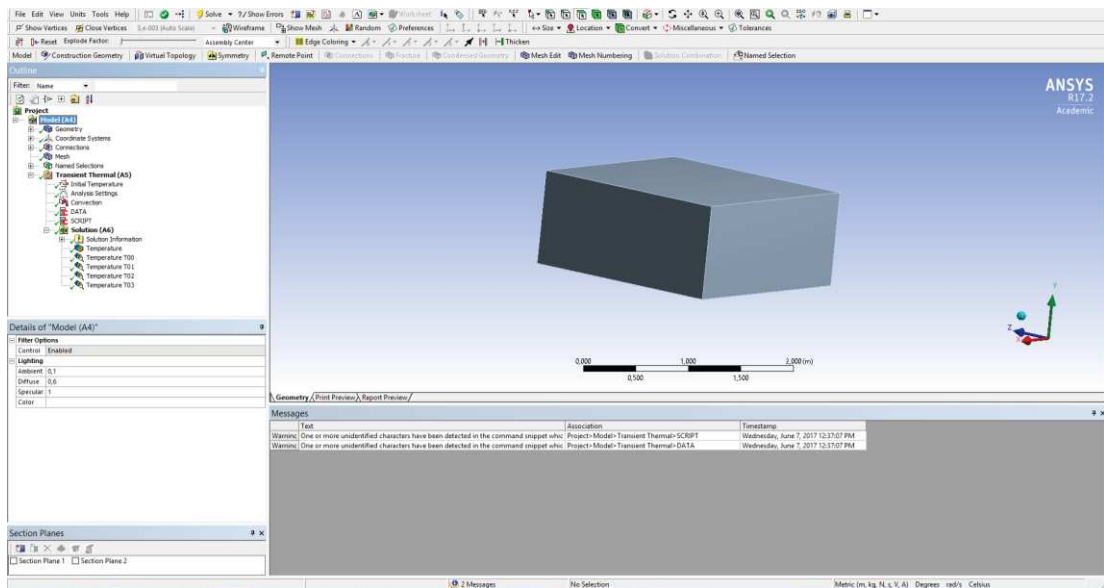


Figura 3.28 – Interface da seção *Mechanical* do software *Ansys*.

Para iniciar a modelagem, é necessário utilizar a opção *Transient Thermal* e posteriormente configurar os materiais e suas propriedades utilizados na peça a ser modelada na opção *Engineering Data*. Configurados os materiais, faz-se o lançamento da geometria. Finalizado o lançamento da estrutura, parte-se para a seção *Mechanical* do programa, onde são inseridos os dados e, posteriormente, a execução da modelagem.

O primeiro passo é inserir os comandos para a geometria criada. Nesses comandos, são inseridas as informações de temperatura inicial do concreto no seu lançamento e a equação utilizada pelo programa para a geração interna de calor, dada pela multiplicação entre os fatores massa específica, calor específico, consumo de cimento e coeficiente de elevação adiabática.

Em seguida, define-se os pontos de coordenadas que servirão para indicar o local onde se deseja obter os resultados de temperatura. Dessa forma, foram posicionados pontos de coordenadas no centro de cada camada, conforme aconteceu no monitoramento em campo.

Um ponto crucial para bons resultados na modelagem é a geração da malha de elementos finitos. A malha foi gerada de modo a obter uma conexão precisa entre os elementos, visando melhores precisões nos resultados. Para a análise tridimensional dos protótipos de blocos de fundação, a malha desenvolvida pelo programa resultou em em 5865 nós e 1176 elementos, como se pode observar na Figura 3.29 e já para o bloco monitorado em campo, foi gerada uma malha de elementos finitos com 10197 nós e 1968 elementos, conforme apresentado na

Figura 3.30, nesse caso, devido à simetria do elemento analisado, foi possível gerar um modelo e aplicar a função de simetria presente no *Ansys*.

Figura 3.29 – Malha de elementos finitos usada no programa *Ansys* para a simulação térmica do protótipo de bloco.

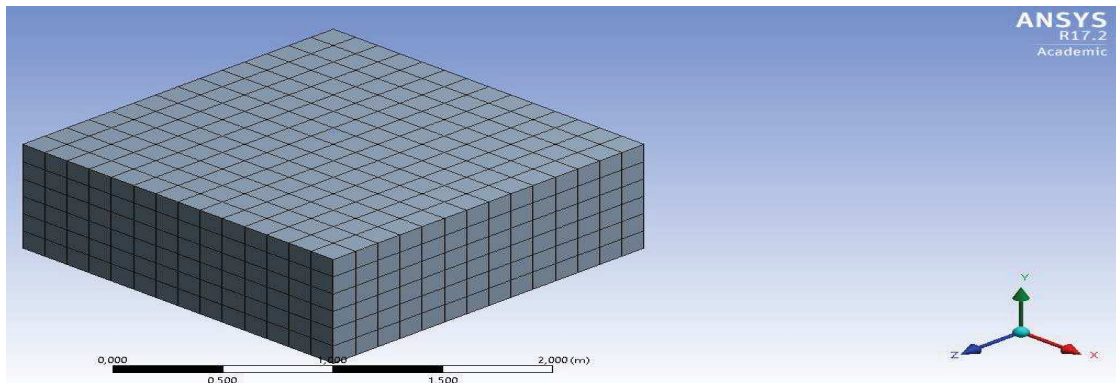
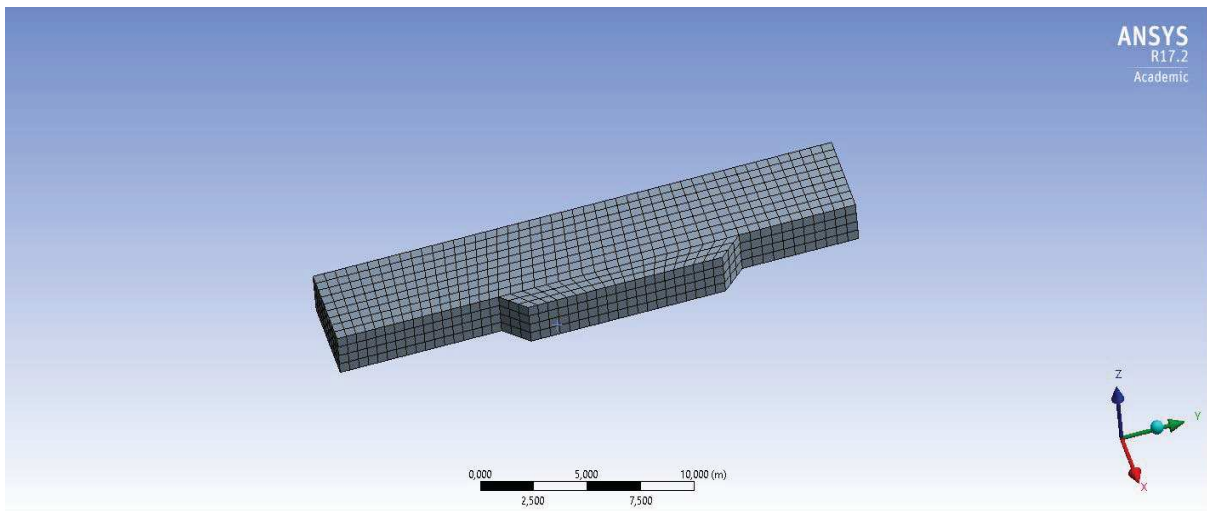


Figura 3.30 – Malha de elementos finitos gerado pelo *Ansys* para simulação térmica do bloco de fundação monitorado em obra.



Para modelagens, o *ANSYS* necessita de outras duas programações identificadas como *DATA* e *SCRIPT*. No comando *DATA* identifica-se o tempo total desejado para a análise. No comando *SCRIPT* não se acrescenta nenhum dado de entrada, contendo apenas a programação em Fortran, utilizada pelo programa. O modelo matemático que rege o comportamento do concreto utilizado pelo programa foi desenvolvido com base no trabalho de Wu *et al.* (2011), em que se usa as Equações 3.13 e 3.14, para determinação do tempo equivalente e a geração interna de calor.

$$te = \sum_0^1 \exp \left[ \frac{Ea}{R} \left( \frac{1}{293} - \frac{1}{273+T} \right) \right] \Delta t \quad (3.13)$$

$$Q = \frac{Q_{inf} \cdot a^c \cdot c \cdot teq^{c-1}}{(a^c + teq^c)^2} \quad (3.14)$$

Em que:

te = tempo equivalente;

Ea = energia de ativação;

R = constante universal dos gases;

$\Delta t$  = incremento de tempo;

Q = geração interna de calor;

Qinf, a, c = parâmetros do material.

Após a definição de todos os parâmetros necessários, o modelo está pronto para ser rodado e posteriormente apresentar os resultados de temperatura em cada coordenada definida anteriormente.

## **CAPÍTULO 4**

### **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Neste capítulo são apresentados os resultados e discussões da pesquisa. Primeiramente são expostos os resultados da temperatura influenciada pelos tipos e consumo de cimento em concretos massa, obtidos por meio de ensaio adiabático e também monitoramento em campo e posteriormente é realizada uma análise e discussão dos resultados, apresentando gráficos de tempo em relação à temperatura de cada caso estudado. Em seguida são exibidos os resultados obtidos por meio da modelagem feita pelo programa *Ansys*, o modelo de previsão de temperatura e tensão proposto pela pesquisa e uma análise comparativa com os resultados reais apresentados *in loco*. Por fim é apresentado o monitoramento realizado em campo e a utilização do modelo proposto na pesquisa para o caso estudado, como forma de validação para casos de blocos de fundação em obras urbanas.

#### **4.1 ANÁLISE TÉRMICA DOS BLOCOS CONCRETADOS**

Todos os blocos analisados na pesquisa foram concretados conforme já dito anteriormente, sob mesmas condições e no mesmo local para não haver interferência significativa com relação a temperatura ambiente.

##### **4.1.1. Ensaio de Adiabáticas**

Para todos os casos analisados de diferentes tipos de cimento, foram realizados ensaios de elevação adiabática de temperatura do concreto, característica muito importante que se deve ter conhecimento para se utilizar em modelos matemáticos de previsão de temperatura.

Na Figura 4.1 são apresentados os resultados de elevação adiabática para cada concreto com tipo de cimento diferentes, referentes às primeiras 24 horas. Na Figura 4.2 são apresentados os resultados de elevação adiabática para o período de 28 dias.

Figura 4.1 – Resultados de elevação adiabática por 24 horas.

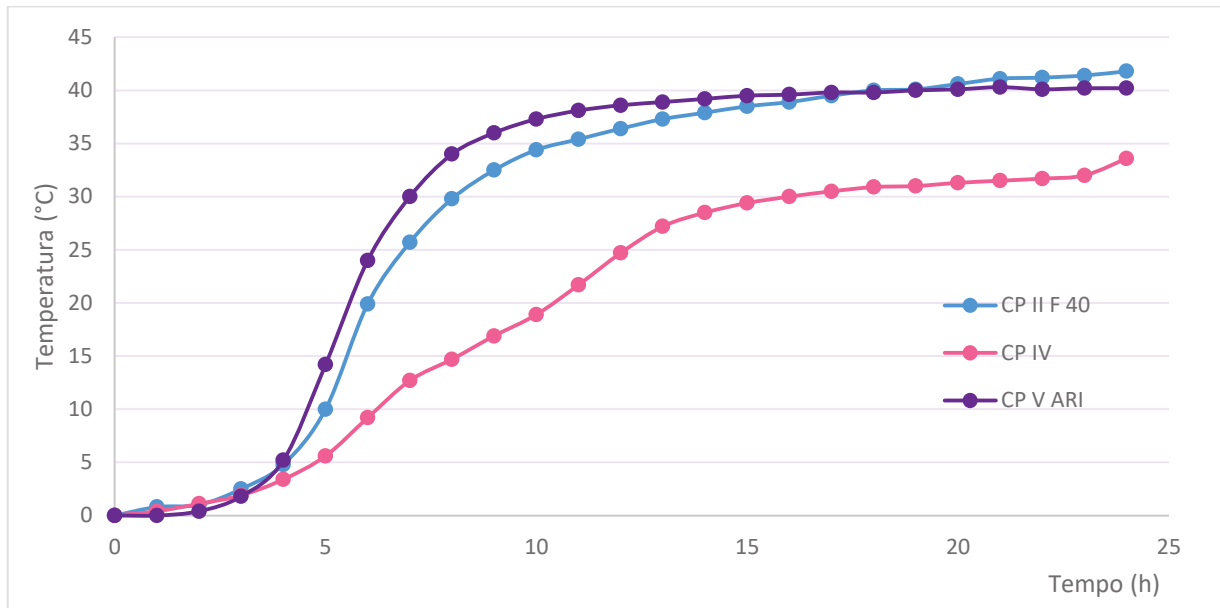
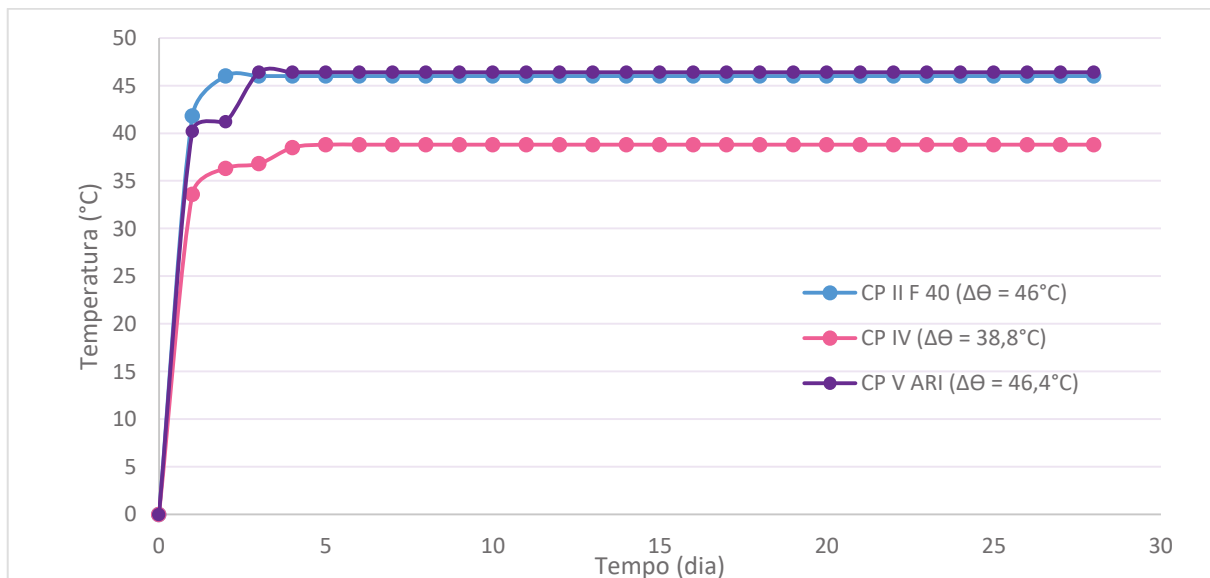


Figura 4.2 – Resultados de elevação adiabática por 28 dias.



Analisando os resultados de adiabática, percebe-se que os cimento CP II F-40 e CP V-ARI apresentaram temperaturas máximas muito próximas, porém o ganho de temperatura do cimento CP V-ARI foi mais rápido quando comparada com o restante. Já o cimento CP IV apresentou a menor temperatura máxima, conforme já era esperado no trabalho, uma vez que ele apresenta adições que ajudam na redução da temperatura de hidratação.

#### 4.1.2. Monitoramento de temperatura nos protótipos de blocos

Para todos os casos analisados, foram realizados monitoramentos de temperatura nos blocos concretados e, também, da temperatura do ambiente. Como citado por Silveira (1961), o controle da temperatura do ambiente é indispensável para se conhecer a temperatura das superfícies dos blocos de concreto, durante a construção. As temperaturas das superfícies expostas obtêm-se a partir da temperatura do ar, mediante correções que resultam dos efeitos da convecção e da radiação solar.

Os resultados de monitoramento de temperatura obtidos em cada um dos blocos concretados estão apresentados nas Figuras 4.3 a 4.6.

Figura 4.3 – Resultados de temperaturas do concreto com 350 kg/m<sup>3</sup> do cimento CP II F-40 e ambiente.

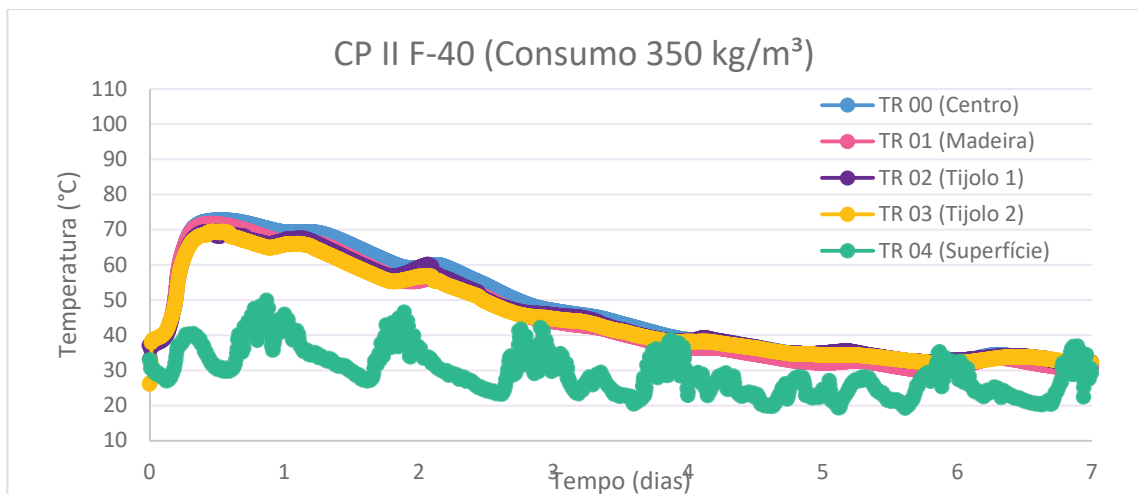


Figura 4.4 – Resultados de temperaturas do concreto com 350 kg/m<sup>3</sup> do cimento CP IV e ambiente.

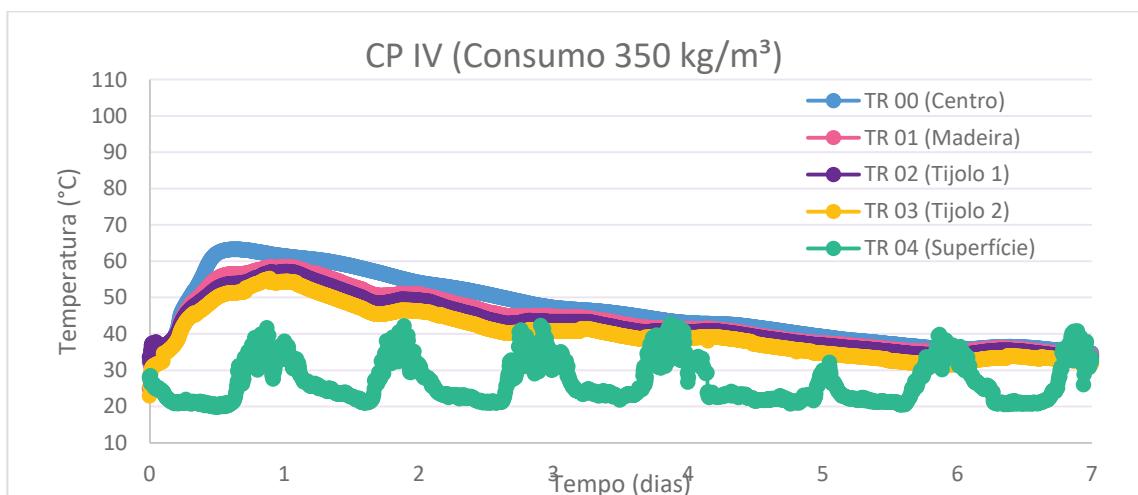
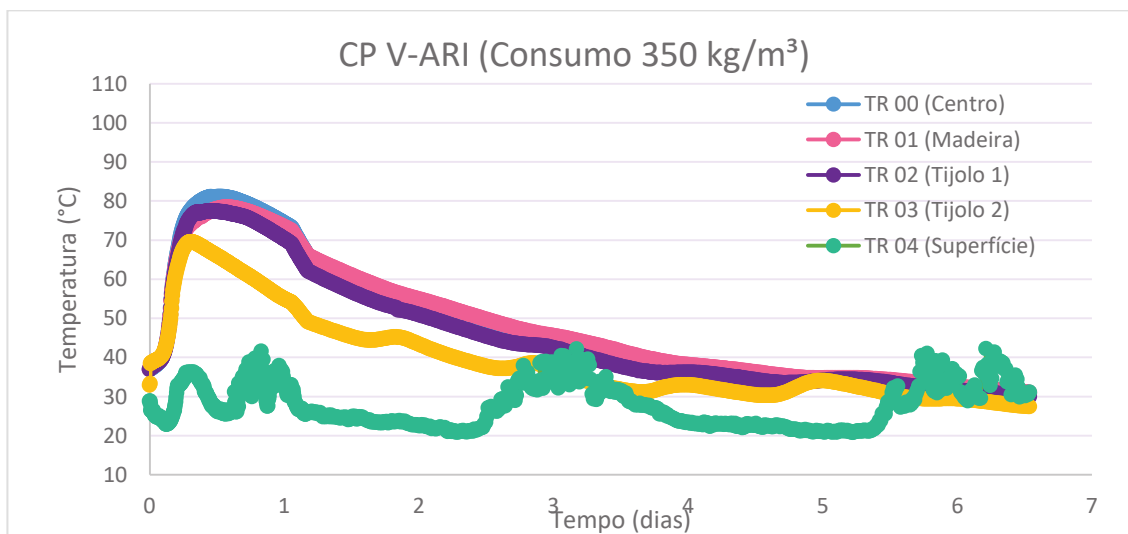
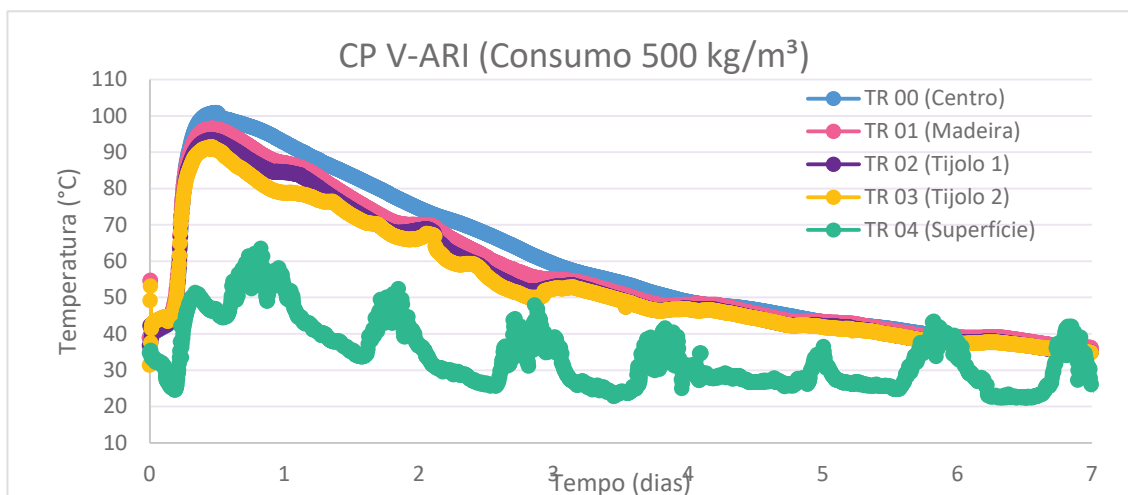


Figura 4.5 – Resultados de temperaturas do concreto com 350 kg/m<sup>3</sup> do cimento CP V-ARI e ambiente.Figura 4.6 – Resultados de temperaturas do concreto com 500 kg/m<sup>3</sup> do cimento CP V-ARI e ambiente.

### 4.1.3. Análise dos resultados

Todas as temperaturas máximas atingidas nos concretos e no ambiente no dia analisado estão apresentadas na Tabela 4.1. Os resultados obtidos pelo termômetro instalado na superfície devem ser desconsiderados, pois apresentaram interferências com a temperatura ambiente, gerando leituras espúrias.

Em todos os casos estudados e monitorados, os resultados de máxima temperatura no ensaio de adiabática foram próximos aos medidos no centro do bloco, variando cerca de 6°C para os cimentos CP II F-40 e CP IV e cerca de 1°C para o cimento CP V-ARI. Para o concreto com aumento de consumo de cimento, o ensaio de adiabática não foi realizado, pois a temperatura

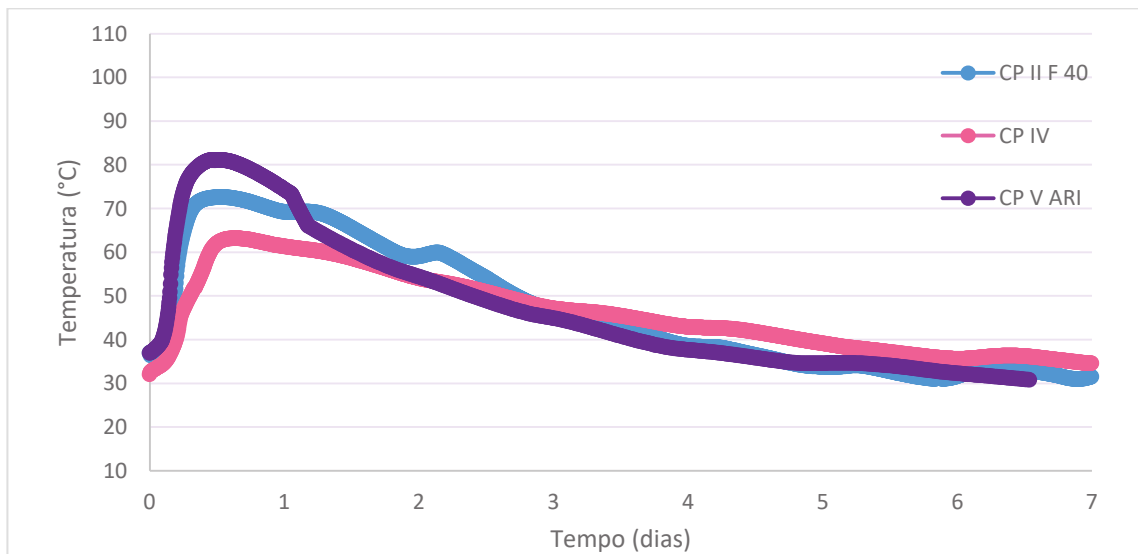
esperada era alta e a sala onde se realiza o ensaio poderia não suportar e apresentar resultados incoerentes.

Tabela 4.1 – Temperaturas máximas medidas em cada monitoramento de temperatura.

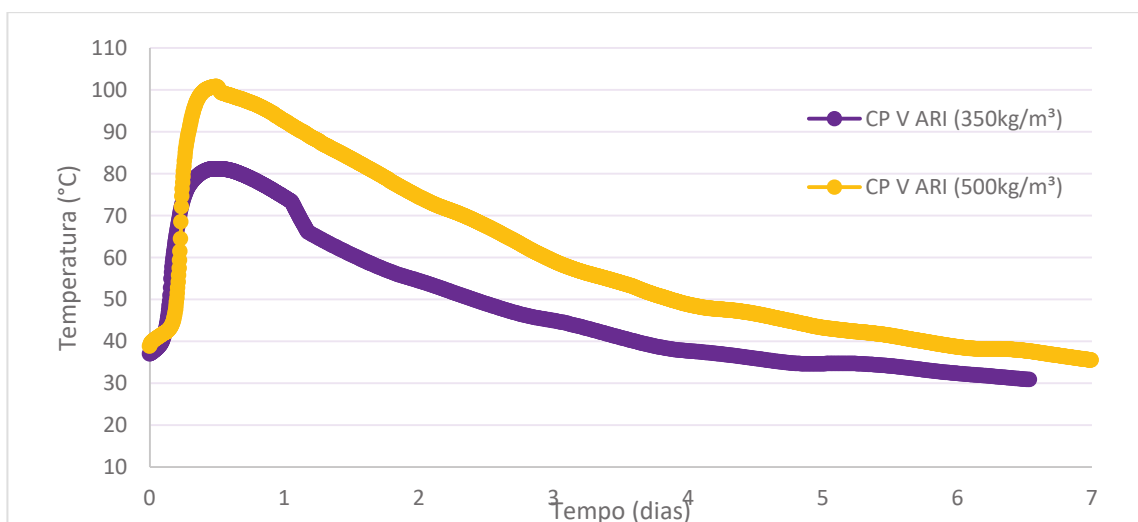
Consumo de cimento		350 kg/m <sup>3</sup>	350 kg/m <sup>3</sup>	350 kg/m <sup>3</sup>	500 kg/m <sup>3</sup>
Tipo de cimento		CP II F-40	CP IV	CP V-ARI	CP V-ARI
Máx no ensaio de adiabática (°C)		79,90	68,80	80,00	-
Almemos (°C)	TR 00 (Centro)	72,63	63,24	81,13	100,76
	TR 01 (Madeira)	71,66	58,39	78,43	96,50
	TR 02 (Tijolo)	69,56	57,11	77,49	93,29
Estação (°C)	TR 05 (Ambiente)	31,79	30,78	30,81	31,50

Com o intuito de se proceder uma análise mais aprofundada, foram construídos gráficos com os resultados de temperatura obtidos no centro dos blocos concretados, como observado nas Figuras 4.7 e 4.8.

Para os blocos com diferentes tipos de cimento (Figura 4.7), pode-se observar que os comportamentos apresentados são condizentes ao que preconiza a literatura, sendo o concreto com cimento CP V-ARI, de maior área específica e de maior teor de clínquer, o que apresentou um crescimento de temperatura mais rápido, atingindo um pico maior quando comparado com os demais. A curva do CP IV ressaltou um comportamento na linha contrária ao do CP V-ARI, atingindo o pico de temperatura de forma mais lenta e tendo uma variação entre as temperaturas máxima e mínima menor que nos outros casos. A diferença entre o pico de temperatura atingido pelo cimento CP V-ARI e CP IV foi de, aproximadamente, 18°C, o que justifica o uso de cimentos com menor calor de hidratação para minimizar o problema da elevação de temperatura, conforme já exposto por Gadjia e Vangeem (2002). O comportamento do bloco com o CP II F-40 é intermediário em relação aos outros dois, mas é mais próximo ao CP V-ARI do que ao CP IV.

Figura 4.7 – Resultados de temperaturas no centro do bloco com 350 kg/m<sup>3</sup> de cada tipo de cimento.

Para os blocos produzidos com CP V-ARI e contendo consumos de cimento distintos, pode-se observar, na Figura 4.8, que em ambos os casos o comportamento é semelhante, já que se trata de uma comparação entre blocos que possuem um mesmo tipo de cimento. Contudo, é marcante a diferença entre o pico de temperatura atingido em cada caso, sendo cerca de 20°C maior para o concreto com maior consumo de cimento. Novamente o resultado apresentado se mostra de acordo com a literatura, como, por exemplo, em relação ao trabalho realizado por Gadjja e Alsamsam (2006), em que também foram analisados concretos com distintos consumos de cimento, tendo sido evidenciadas significativas diferenças de comportamento térmico no concreto conforme os distintos teores de cimento empregados nas misturas.

Figura 4.8 – Resultados de temperaturas no centro do bloco com 350 kg/m<sup>3</sup> e 500 kg/m<sup>3</sup> de cimento CP V-ARI.

## 4.2 SIMULAÇÃO DE TEMPERATURA PELO ANSYS E MODELO DE PREVISÃO

Para a elaboração da pesquisa, foi utilizado o programa *Ansys* com o intuito de comparar os resultados medidos em campo com a simulação do programa e, posteriormente, visando a comparação desses resultados com os do modelo de previsão proposto pela pesquisa.

### 4.2.1. Análise dos resultados com cimentos distintos

Foi realizada uma simulação de temperatura dos blocos com cimento CP II F-40, CP V-ARI e CP IV, todos com consumo de  $350 \text{ kg/m}^3$ . Os resultados da temperatura máxima atingida pelo *Ansys* estão expostos nas Figuras 4.9 a 4.11.

Da mesma forma como foi feita a análise pelo *Ansys*, foi realizada a análise pelo modelo de previsão proposto pela pesquisa. Nas Figuras 4.11 a 4.14 são apresentados os gráficos comparativos entre os resultados obtidos pelo *Ansys*, pelo modelo proposto e pela medição em campo.

Figura 4.9 – Temperatura máxima atingida na simulação do bloco com cimento CP II F-40 e consumo de  $350 \text{ kg/m}^3$  pelo programa *Ansys*.

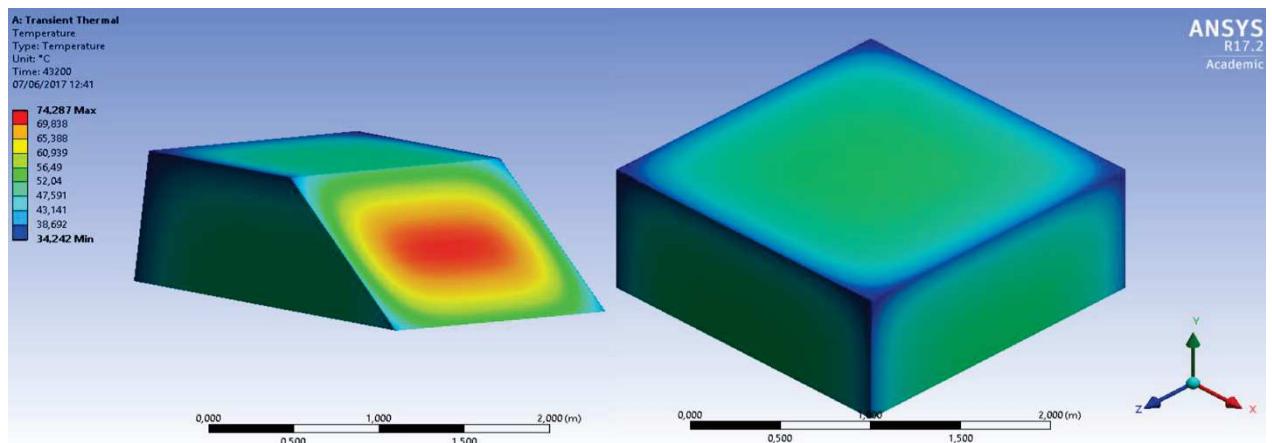


Figura 4.10 – Temperatura máxima atingida na simulação do bloco com cimento CP V-ARI e consumo de 350 kg/m<sup>3</sup> pelo programa *Ansys*.

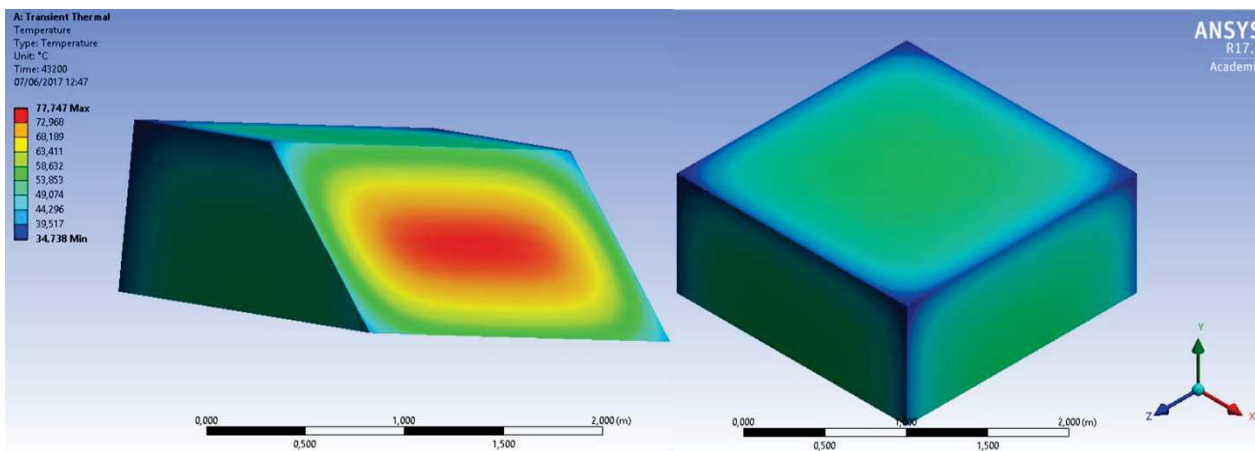


Figura 4.11 – Temperatura máxima atingida na simulação do bloco com cimento CP IV e consumo de 350 kg/m<sup>3</sup> pelo programa *Ansys*.

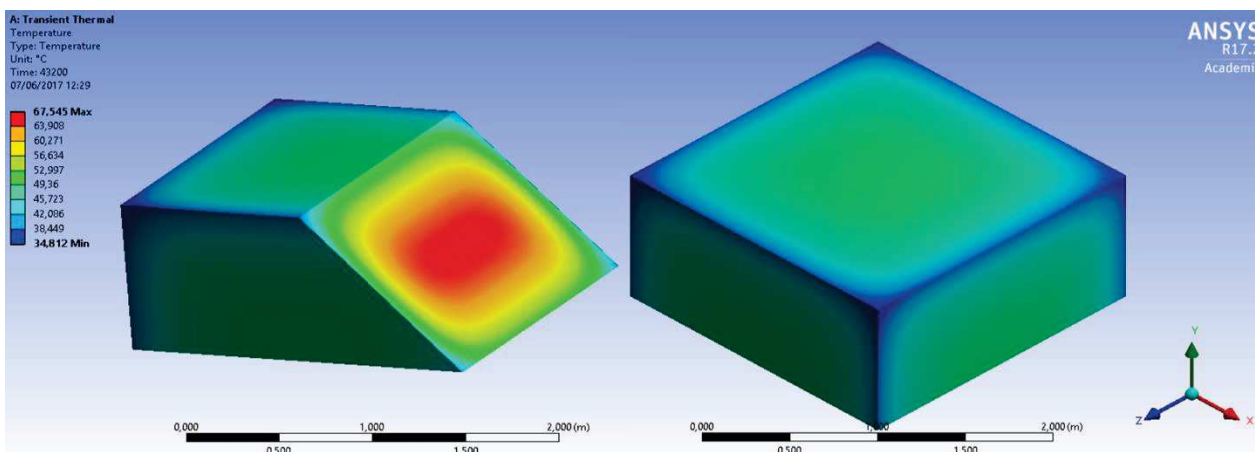


Figura 4.12 – Comparação entre *Ansys*, modelo e campo do bloco com cimento CP II e consumo 350 kg/m<sup>3</sup>.

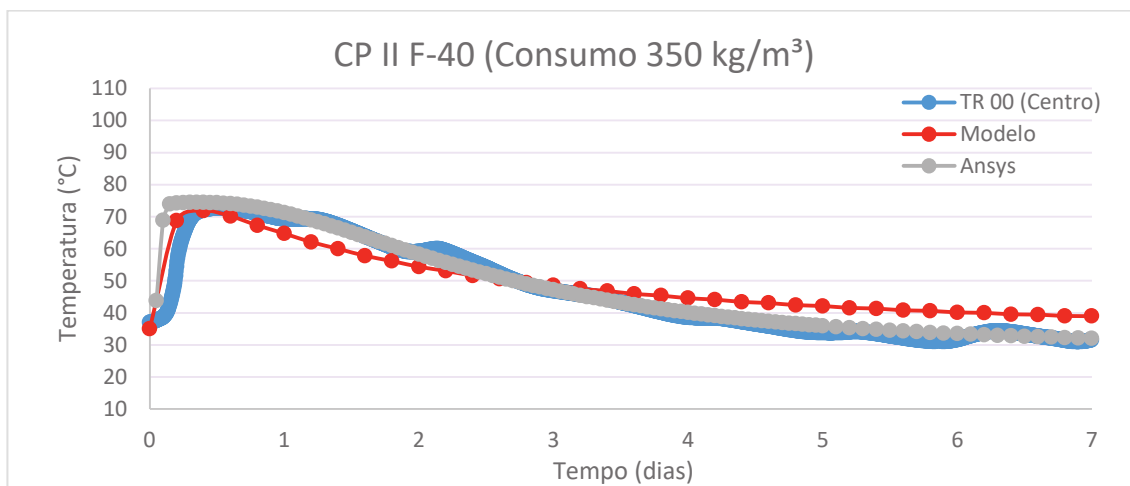
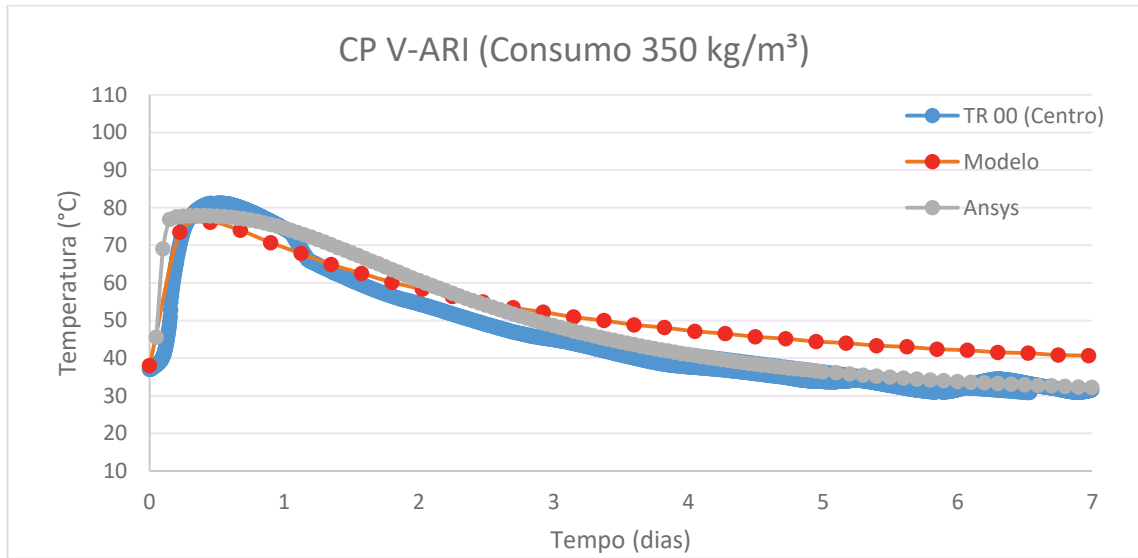
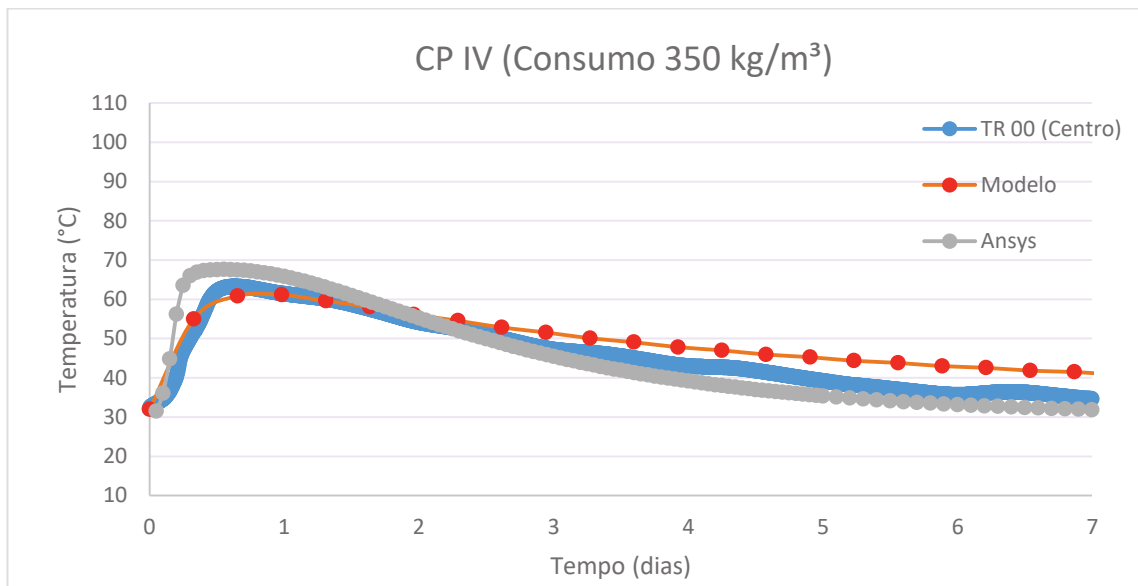


Figura 4.13 – Comparação entre *Ansys*, modelo e campo do bloco com cimento CP V-ARI consumo 350 kg/m<sup>3</sup>.Figura 4.14 – Comparação entre *Ansys*, modelo e campo do bloco com cimento CP IV consumo 350 kg/m<sup>3</sup>.Tabela 4.2 – Temperaturas máximas encontradas no *Ansys*, modelo da pesquisa e campo.

Consumo de cimento		350 kg/m <sup>3</sup>	350 kg/m <sup>3</sup>	350 kg/m <sup>3</sup>	500kg/m <sup>3</sup>
Tipo de cimento		CP II F-40	CP IV	CP V-ARI	CP V-ARI
TR 00 (Centro)	Almemo (°C)	72,63	63,24	81,13	100,76
	<i>Ansys</i> (°C)	74,29	67,55	77,45	102,02
	Modelo de previsão (°C)	71,86	61,13	76,12	104,23

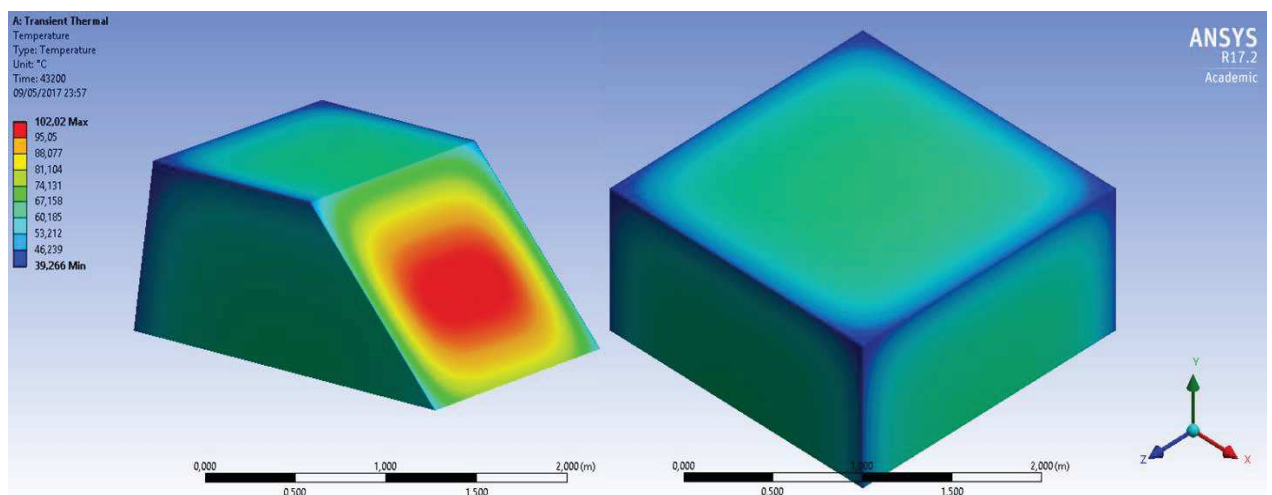
Com base nos resultados apresentados, pode-se perceber que a temperatura máxima medida e as apresentadas pelos modelos foram consideravelmente próximas, como se pode observar, também, na Tabela 4.2. Os comportamentos globais das temperaturas com o tempo também são muito próximos (Figuras 4.12 a 4.14), apenas com uma leve superestimação dos valores após os três dias, para as temperaturas previstas pelo modelo proposto nesta pesquisa. De modo geral, tem-se uma adequada previsibilidade de comportamento térmico, seja por meio do modelo *Ansys*, seja pelo modelo proposto na presente pesquisa.

De acordo com Taylor, Famy e Scrivener (2001), a DEF tem sido observada em casos de concretos que foram curados termicamente a temperaturas próximas ou superiores a 70°C e de acordo com Gomes (2011), a temperatura recomendada para a eliminação do risco considerável de formação de DEF é de que seja melhor que 65°C, diante disso e analisando os resultados de temperatura expostos na Tabela 4.2, todos os concretos, com exceção apenas do concreto em que se utilizou o cimento CP IV, apresentaram temperaturas consideradas suscetíveis ao aparecimento de DEF.

#### 4.2.2. Análise dos resultados com consumos distintos

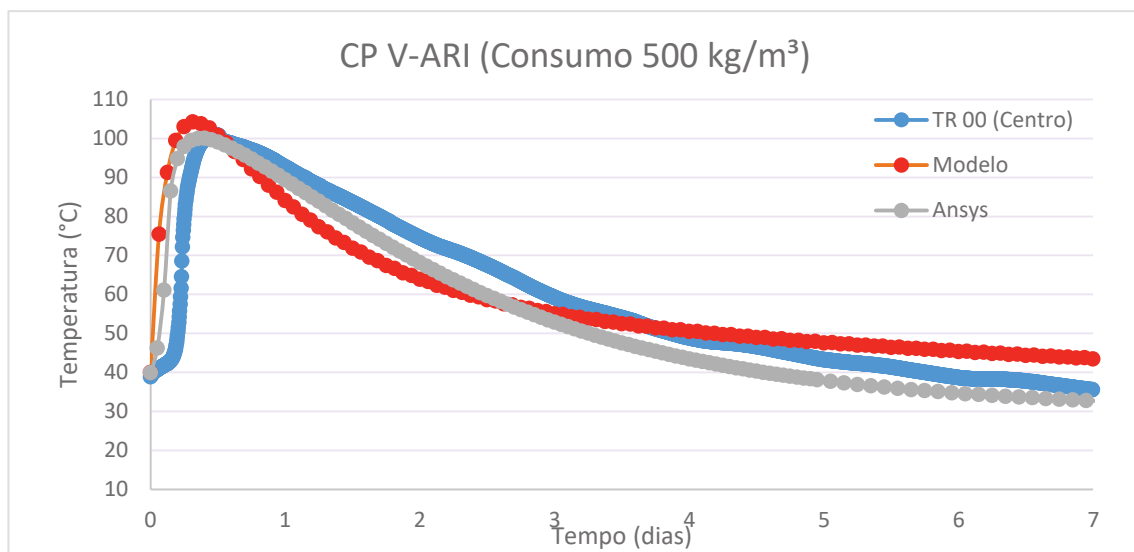
Foi realizada uma simulação de temperatura dos blocos com cimento CP V-ARI com consumos de 350 kg/m<sup>3</sup> e de 500 kg/m<sup>3</sup>, por meio de modelagem por elementos finitos utilizando o programa *Ansys*. Os resultados da temperatura máxima atingida estão apresentados, respectivamente, nas Figuras 4.10 e 4.15.

Figura 4.15 – Temperatura máxima apresentada na simulação do bloco com cimento CP V-ARI e consumo de 500 kg/m<sup>3</sup> pelo programa *Ansys*.



Da mesma forma como foi feita a análise pelo *Ansys*, foi realizada a análise pelo modelo de previsão proposto pela pesquisa. Na Figura 4.16 é apresentado o gráfico comparativo entre os comportamentos térmicos obtidos pelo *Ansys*, pelo modelo proposto na pesquisa e pela medição em campo (para o cimento CP V-ARI e consumo de 500 kg/m<sup>3</sup>), em que pode-se perceber que os resultados em ambos os modelos foram muito próximos do comportamento real monitorado em campo.

Figura 4.16 – Comparação entre *Ansys*, modelo e campo do bloco com cimento CP V-ARI consumo 500 kg/m<sup>3</sup>.



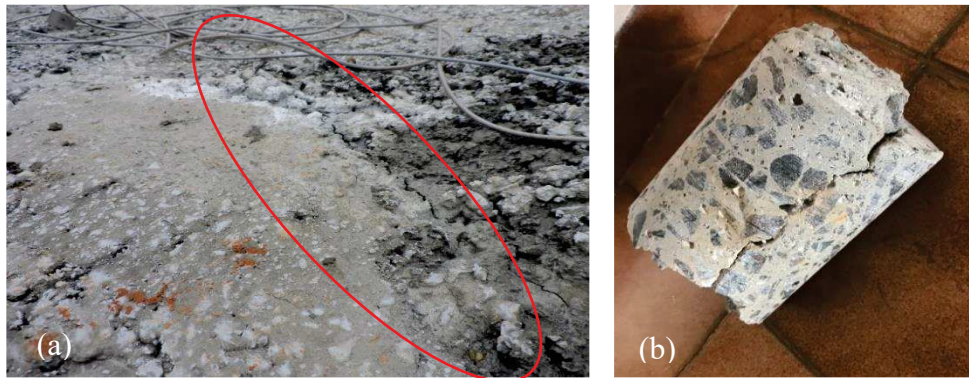
### 4.3 SIMULAÇÃO DE TENSÃO PELO MODELO DE PREVISÃO

A análise de tensão dos blocos, foi realizada por meio de um método simplificado, em que se analisou a tensão instalada em comparação a tração na flexão e a tração direta. Para uma análise de blocos de fundação, em que o concreto encontra-se confinado, acredita-se que a ruptura tende a ocorrer na flexão, porém os autores Mier e Vliet (2002) citam que a tração direta é a mais adequada para análise de fissuração, portanto é apresentado dois resultados probabilidade de fissuração, sendo um a partir da análise da tensão na flexão e outra da tração direta.

Após 7 dias de concretados os blocos, foi analisado o aparecimento de fissuras devido à temperatura. Apenas no bloco com o consumo de 500 kg/m<sup>3</sup> e cimento CP V-ARI, houve o surgimento de fissuras. Para analisar de maneira mais aprofundada o tipo de fissura, foi realizada extração de corpos de prova, buscando saber se a fissura eventualmente seria superficial ou se estava ocorrendo no interior da peça, (o que foi comprovado, como se pode

observar na Figura 4.17), ratificando, assim, uma tipologia de fissuração volumétrica típica dos fenômenos de retração térmica.

Figura 4.17 – Bloco concretado com CP V-ARI e consumo de cimento de 500 kg/m<sup>3</sup>. (a) Fissura no bloco; (b) Corpo de prova extraído do bloco



De acordo com o modelo de previsão proposto pela pesquisa, e analisando com base na resistência à tração na flexão o único bloco com probabilidade de fissuração foi justamente o que foi produzido com cimento CP V-ARI e com consumo de 500 kg/m<sup>3</sup>, em que a tensão de tração instalada ultrapassou a resistência à tração na flexão do concreto, porém, ao se analisar a probabilidade de fissuração por meio da tração direta, todos os blocos seriam fissurados, conforme apresentados nas Figuras 4.18 a 4.21.

Figura 4.18 – (a) Resultado do modelo de previsão para o bloco com CP II F-40 e consumo de cimento de 350 kg/m<sup>3</sup>; (b) Gráfico de tensão contra o tempo.

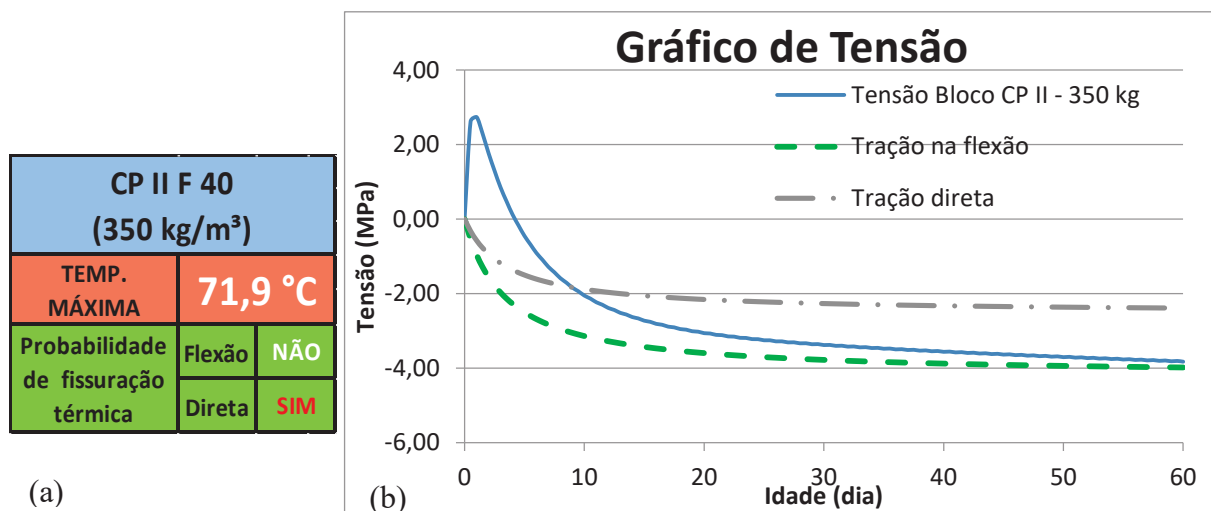


Figura 4.19 – (a) Resultado do modelo de previsão para o bloco com CP IV e consumo de cimento de 350 kg/m<sup>3</sup>; (b) Gráfico de tensão contra o tempo.

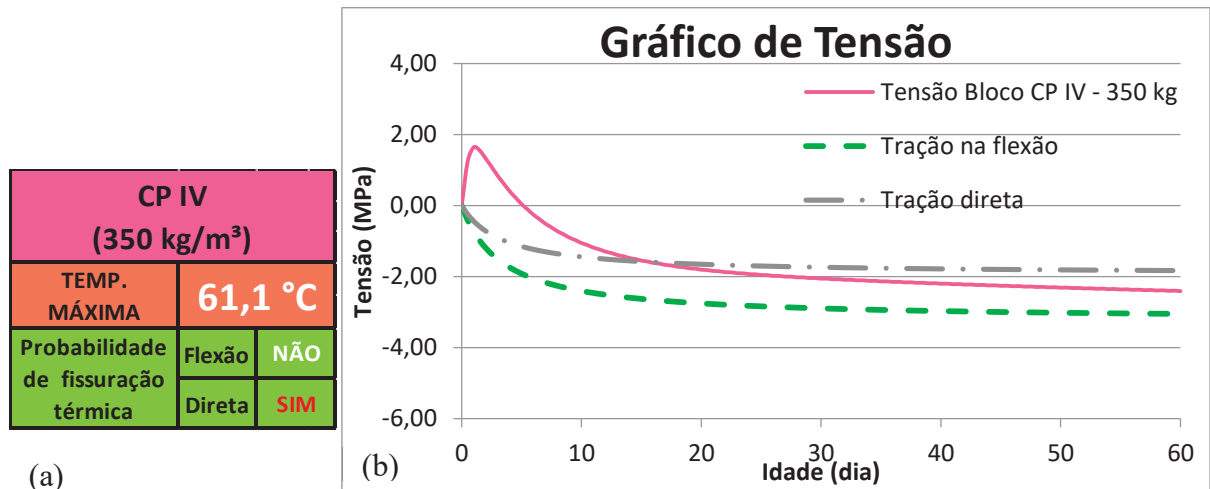


Figura 4.20 – (a) Resultado do modelo de previsão para o bloco com CP V-ARI e consumo de cimento de 350 kg/m<sup>3</sup>; (b) Gráfico de tensão contra o tempo.

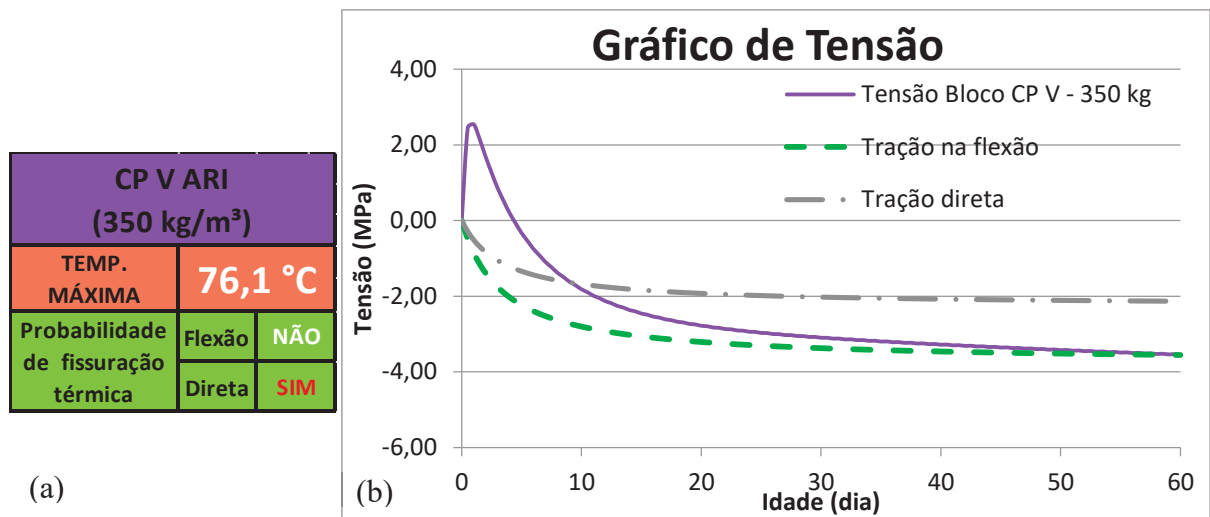
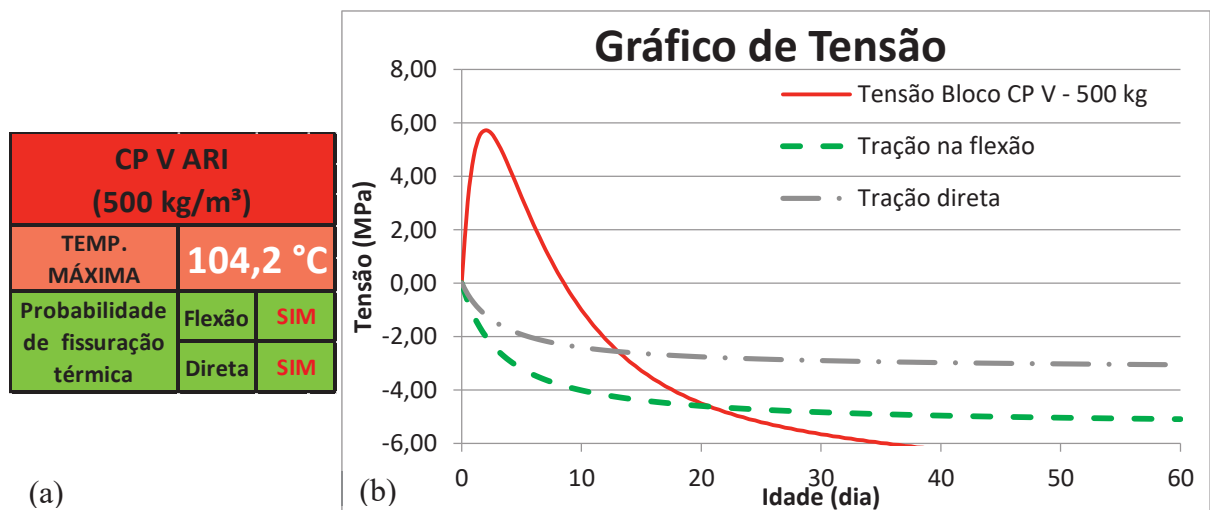


Figura 4.21 – (a) Resultado do modelo de previsão para o bloco com CP V-ARI e consumo de cimento de 500 kg/m<sup>3</sup>; (b) Gráfico de tensão contra o tempo.



Analisando os gráficos de tensão, pode-se perceber que no modelo de previsão, ao considerar a resistência à tração direta do bloco, todos os casos analisados apresentaram resultado favorável ao aparecimento de fissuras, o que não foi visto em campo. Já na análise considerando resistência à tração na flexão, apenas o bloco com cimento CP V-ARI e consumo de  $500 \text{ kg/m}^3$ , apresentou uma tensão instalada maior que a resistência à tração na flexão, que, no modelo, se mostrou por volta de 20 dias, porém, com a análise em campo, as fissuras se iniciaram mais rapidamente, por volta de 7 dias. Este resultado, mais rápido, provavelmente é justificado pelo processo de termo-ativação, potencializado pelo aumento elevado da temperatura (não sendo considerado no modelo de previsão proposto).

Com relação aos outros blocos analisados, é possível observar que o bloco concretado com cimento CP V-ARI foi o que chegou mais próximo da curva de tração na flexão, ou seja, apresentou uma possibilidade de ocorrência de fissuras maior que os outros blocos analisados com outros tipos de cimento.

## 4.4 VALIDAÇÃO DO MODELO EM CAMPO

Como forma de validação do modelo proposto pela pesquisa, foi monitorado em campo um bloco de fundação localizado na região de Goiânia e posteriormente realizado a análise de temperatura e tensão por meio do método de previsão.

### 4.4.1. Resultados

Por meio do monitoramento foi possível realizar medições de temperatura no centro do bloco de fundação analisado e relacionar com tempo para poder comparar com o modelo de previsão proposto pela pesquisa.

Na Figura 4.22 é apresentado o gráfico comparativo entre a medição em campo, o resultado apresentado pelo programa *Ansys*, o ganho de temperatura considerado no modelo e ainda um ajuste considerando o fenômeno de termo-ativação que esteve presente no processo de hidratação do concreto analisado e na Tabela 4.3 está descrito o valor de temperatura máximo obtido em cada caso analisado.

A curva chamada de termo-ativação foi ajustada com base na curva gerada pelo modelo de previsão proposto pela pesquisa. Esse ajuste foi realizado manualmente, pois não é

contemplado durante o processo de cálculo, por meio da multiplicação do tempo por uma constante de modo a ficar mais próximo da curva real gerada pela medição em campo, apenas com o intuito de se observar que as curvas apresentam resultados de temperatura máxima bastante próximas.

Figura 4.22 – Gráfico comparativo entre medição em campo e as previsões oriundas dos modelos considerados.

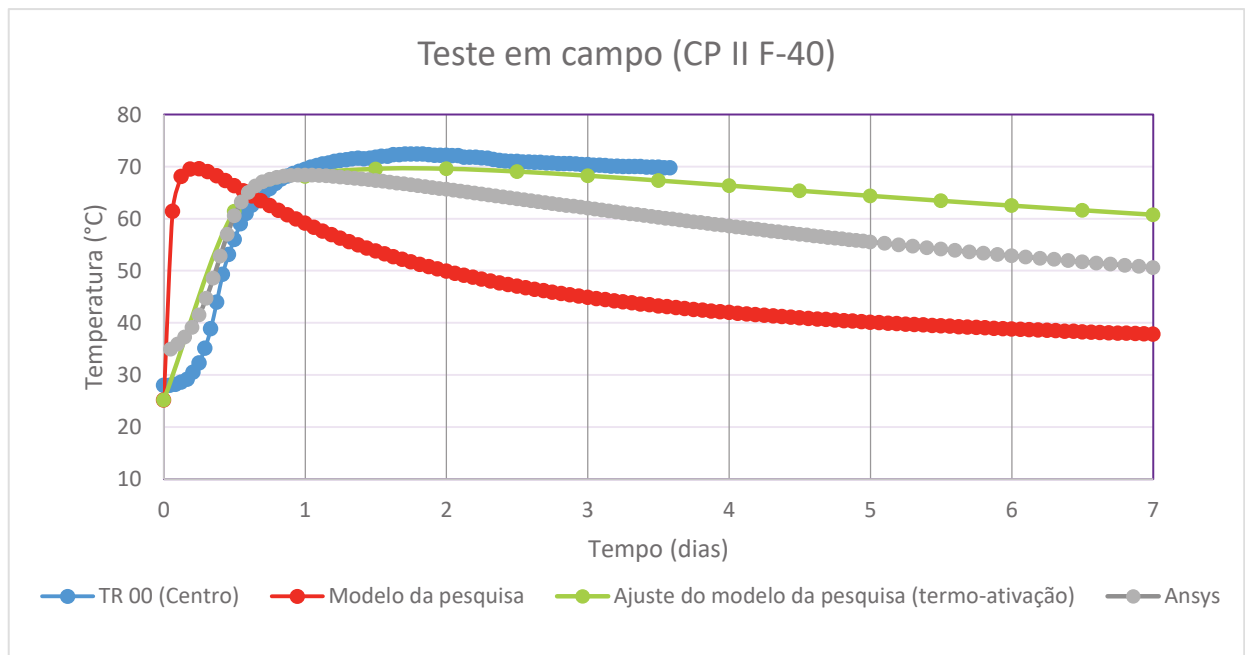


Tabela 4.3 – Temperaturas apresentadas em campo e no modelo de previsão.

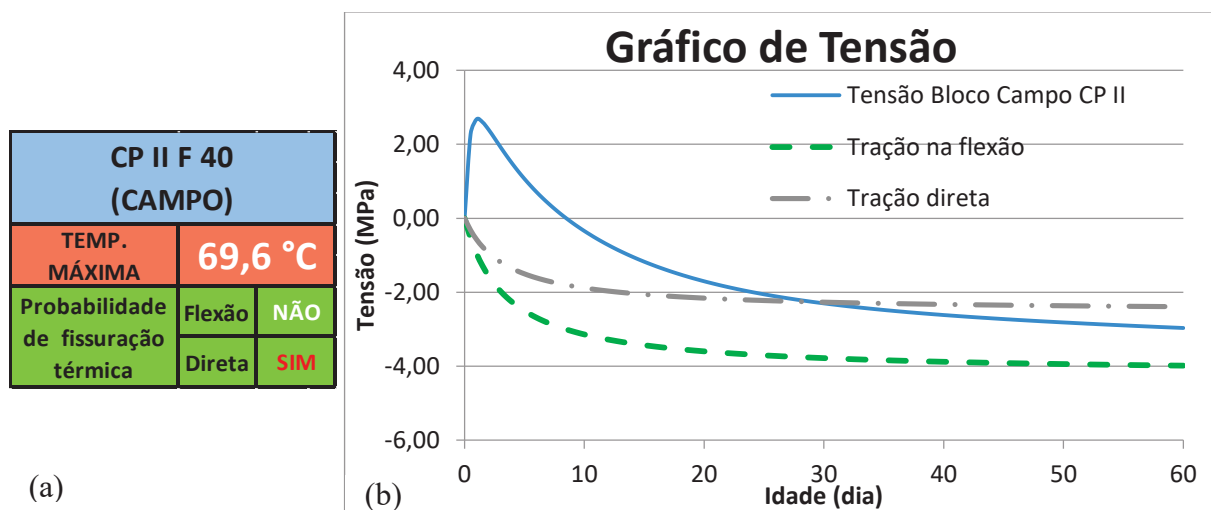
Traço		$f_{ck}$ 40 brita 0 e 1 slump 10±2
Tipo de cimento		CP II F-40
TR 00 (Centro)	Termopar em campo (°C)	72,40
	Ansys (°C)	68,38
	Modelo de previsão (°C)	69,60

Por meio dos resultados de temperatura é possível observar que o valor máximo obtido se apresentou próximo, com uma variação de aproximadamente 4%, porém foi observado que o concreto monitorado apresentou retardo no ganho de temperatura quando comparada com o modelo de previsão, o que pode ser explicado pelo fato da reação de hidratação ser considerada termo-ativada e o modelo proposto não contemplar essa termo-ativação, diferentemente do programa *Ansys*. Esse processo de termo-ativação faz com que a reação se

desenvolva mais lentamente em função da temperatura inicial de lançamento ser mais baixa, devido a adição de sílica ativa e gelo no traço, porém não interfere na temperatura máxima atingida.

Posteriormente à análise de temperatura, também foi realizado um monitoramento do bloco de fundação com relação ao aparecimento de fissuras de origem térmica. Por meio desse monitoramento, pode-se observar que o bloco não apresentou fissuras e o mesmo já era previsto no modelo de previsão proposto pela pesquisa ao se analisar a resistência à tração na flexão do concreto, pois ao se analisar a tração direta, o modelo proposto apresentou que haveria probabilidade de aparecimentos de fissuras térmicas, conforme Figura 4.23.

Figura 4.23 – (a) Resultado de probabilidade de aparecimento de fissuras pelo modelo de previsão. (b) Gráfico de Tensão.



Por meio do resultado de tensão, foi possível observar que o bloco analisado apresentou um resultado mais favorável ao não aparecimento de fissuras quando comparado com os blocos concretados durante a pesquisa e isso pode ser explicado pelo uso de gelo e sílica ativa, que possibilitaram a diminuição da temperatura de lançamento do concreto aplicado, reduzindo, consequentemente, o calor de hidratação, pois segundo Furnas (1997) e Santos (2011), a substituição do clínquer por pozalanas, que no caso estudado foi a sílica ativa, reduz a cinética da reação de hidratação, podendo reduzir também a sua amplitude (gradiente térmico), assim como o uso de gelo em substituição a parte da água do traço de concreto. Em particular, o gelo reduz a cinética de reação nas primeiras idades, bem como, ao reduzir a temperatura de lançamento do concreto, ele contribui para a redução dos gradientes térmicos (diferença entre a temperatura máxima e a temperatura de estabilização final do concreto).

## **CAPÍTULO 5**

### **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Neste item são apresentadas as considerações finais sobre o trabalho de uma forma geral. São, portanto, expostas as conclusões obtidas a partir dos resultados do programa experimental e do modelo de previsão proposto pela pesquisa. Por fim, são sugeridos tópicos relacionados a esta pesquisa para trabalhos futuros.

#### **5.1 CONCLUSÕES**

Os resultados obtidos apontaram para duas linhas distintas e complementares de conclusões, sendo elas: as características do concreto com cada tipo e consumo de cimento analisado e a análise do modelo de previsão proposto pela pesquisa em comparação com as medições em campo e com a previsão pelo programa *Ansys*.

##### **5.1.1. Tipo e consumo de cimento**

A seguir são apresentados os tópicos referentes às conclusões que foram obtidas por meio da análise dos resultados de desempenho, resistência e temperatura máxima final atingida em cada um dos casos de concreto ensaiado no trabalho:

- Ao se comparar os resultados de resistência à compressão dos concretos com a mesma composição de materiais, porém cimentos distintos, houve uma divergência bastante significativa nos valores, mesmo mantendo a mesma relação *a/c*. Os concretos elaborados com os cimentos CP II F-40 e CP V-ARI apresentaram resistência característica aos 28 dias de cerca de 34 MPa, porém o cimento CP IV apresentou uma resistência de 22 MPa, sendo que todos os concretos foram aplicados na peça com o mesmo abatimento. Diante disso, conclui-se que para se usar o cimento CP IV, considerado de baixo calor de hidratação, é necessário um aumento do seu consumo (concomitante a uma redução da relação água/cimento) para se atingir uma mesma resistência de concretos com os outros cimentos estudados. Esse aumento de consumo, sem dúvida, irá influenciar em termos do aumento de temperatura máxima final atingida na peça concretada, o que poderá tornar mais complexa a análise quanto ao

uso de um tipo de cimento cuja resistência final é consideravelmente mais baixa (comparativamente a outros cimentos considerados);

- Analisando o ensaio de elevação adiabática realizada nos três concretos com cimentos distintos, conclui-se que o concreto com cimento CP II F-40 apresenta um desempenho muito próximo ao cimento CP V-ARI, pois ambos apresentaram temperatura máxima muito próximas. Porém, mesmo com esse resultado, as leituras de temperatura no bloco estudado foram maiores para o concreto com o cimento CP V-ARI, chegando a 80°C;
- O monitoramento de temperatura dos concretos analisados com consumos distintos, porém o mesmo cimento, apresentaram resultados bastante diferentes. Diante disso, conclui-se que o consumo de cimento é um importante fator que deve ser levado em consideração para a elaboração de traços para concretos massa, pois com um aumento de 150 kg de cimento por m<sup>3</sup> de concreto, houve um aumento de cerca de 20°C, ocasionando fissuras na estrutura analisada.

### **5.1.2. Modelo de Previsão x *Ansys***

A seguir são apresentados os tópicos referentes às conclusões que foram obtidas por meio da análise dos resultados apresentadas pelo modelo de previsão proposto pela pesquisa e pelo programa *Ansys*, utilizado como meio comparativo ao modelo:

- Por meio da análise de resultados de temperaturas monitoradas nos concretos analisados na pesquisa e as apresentadas no programa *Ansys* e no modelo de previsão proposto, conclui-se que o modelo de previsão apresentou resultados próximos aos reais apresentados em campo e, também, próximos àqueles oriundos da modelagem via *Ansys*. Considerando o fato do modelo de previsão proposto nesta pesquisa ser um modelo mais simplificado, com uma melhor acessibilidade e, ainda, levando-se em conta que ele não depende de um grande conhecimento de linguagem computacional para se conseguir um resultado coerente com a realidade, conclui-se que o referido modelo é uma boa ferramenta preditiva de comportamento térmico, evidentemente com as ressalvas impostas pelas condições limitantes que o cercam;

- Analisando a parte de tensão, o modelo de previsão utiliza um parâmetro simplificado, porém em todos os casos analisados em que se utilizou a resistência à tração na flexão como parâmetro para a análise, foi obtido um resultado coerente com o apresentado em campo, em que o único bloco com fissuração foi aquele com maior consumo de cimento CP V-ARI e com previsão acertada pelo modelo.
- Caso a análise de tensão seja feita considerando a resistência à tração direta, os resultados apresentados pelo modelo de previsão estarão voltados para a segurança da estrutura, porém acredita-se que não seja adequada a análise somente pela tração direta, pois poderá levar a um dimensionamento de concreto inviável economicamente para uso. Por esse motivo, recomenda-se a análise em conjunto de ambas as resistências à tração do concreto.

## **5.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS**

Entendendo a importância do aprofundamento do estudo do comportamento térmico de estruturas de concreto de grandes volumes, e em especial a análise das fissuras oriundas dessa variação física, sugere-se as seguintes abordagens para continuação dessa linha de pesquisa:

- Expandir o estudo para concretos com outros tipos de cimentos mais utilizados em outras regiões distintas do Brasil;
- Fazer uso de agregados com dimensões máximas características e litologias diferentes, para entender como este parâmetro afeta o comportamento térmico do concreto;
- Estudar os traços de concreto massa que correspondem a menor geração de calor de hidratação, utilizando adições de pozolanas e gelo;
- Estudar o comportamento fissuratório da massa de concreto com a utilização de extensômetros interno a esta;
- Realizar a modelagem computacional para a determinação das tensões de tração oriundas do gradiente térmico causado pelo calor de hidratação do cimento;
- Desenvolver modelos de previsão que contemplem, de forma consistente, o efeito da energia de ativação.

## REFERÊNCIAS

ABCP: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - **Estudo técnico – O fenômeno térmico no concreto**. ET - 85. São Paulo, 1987, 48p.

ABCP: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - **Levantamento de resultados de ensaios de calor de hidratação em diferentes tipos de cimento**. São Paulo, 2012.

ABCP: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - **Pesquisa inédita e exclusiva revela cenário do mercado brasileiro de concreto**. São Paulo, 2013.

ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 5753**: Cimento Portland - Ensaio de pozolanicidade para cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro, 2016. 238p.

\_\_\_\_\_**NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro, 2014. 238p.

\_\_\_\_\_**NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997. 8p.

\_\_\_\_\_**NBR 11579**: Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro, 2012. 4p.

\_\_\_\_\_**NBR 12006**: Cimento - Determinação do calor de hidratação pelo método de garrafa de Langavant - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1990. 12p.

\_\_\_\_\_**NBR 13116**: Cimento Portland de baixo calor de hidratação - Especificação. Rio de Janeiro, 1994. 5p.

\_\_\_\_\_**NBR 16372**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015. 11p.

\_\_\_\_\_**NBR NM 15**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de resíduo insolúvel. Rio de Janeiro, 2012. 3p.

\_\_\_\_\_**NBR NM 18**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012. 4p.

\_\_\_\_\_**NBR NM 23**: Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001. 5p.

\_\_\_\_\_**NBR NM 43**: Cimento portland - Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2003. 8p.

\_\_\_\_\_**NBR NM 46**: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003. 6p.

\_\_\_\_\_**NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009. 6p.

\_\_\_\_\_**NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009. 8p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 65: Cimento Portland - Determinação do tempo de pega.** Rio de Janeiro, 2003. 4p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003. 6p.

ACI: AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Effect of Restraint, Volume Change, and Reinforcement on Cracking of Massive Concrete,** Detroit-USA, 1978.

ACI: AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Specifications for structural concrete.** Farmington Hills, 2011.

ACI: AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Report on Thermal and Volume Change Effects on Cracking of Mass Concrete.** Farmington Hills, 2007.

ALVES FILHO, A.; **Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE.** 1ª ed. São Paulo: Érica, 2000. 320 p.

ANDRIOLO, F. R.; SKWARCZYNSKI, T. M. **Concreto Pré-Refrigerado no Brasil: Uma Evolução com Mais de 20 Anos.** São Paulo, 1988.

ANSYS. **Modeling and Meshing Guide.** Canonsburg: ANSYS, INC, 2004.

ASTM: AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – **Cement Standards and Concrete Standards – C 150 – 2015.** Annual Book of ASTM Standard. West Conshohocken, PA.

ASTM: AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – **Standard Test Method for Heat of Hydration of Hydraulic Cement – C 150 – 2015.** Annual Book of ASTM Standard. West Conshohocken, PA.

AURICH, M. **Simulação computacional do comportamento do concreto nas primeiras idades.** 2008. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

AZENHA, M. A. D; CRUZ, J. S.; CAMÕES, A.; FERREIRA, R. M. **Numerical simulation of the structural behavior of concrete tetrapods subject to imposed deformations and applied loads.** 2011. In: CONGRESS ON NUMERICAL METHODS IN ENGINEERING, 2011, Coimbra, Portugal.

AZENHA, M. A. D. **Comportamento do betão nas primeiras idades. Fenomenologia e análise termo-mecânica.** 2004. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, FEUP, Portugal, 2004.

BAMFORTH, P.; CHISHOLM, D. ; GIBBS, J. ; HARRISON, T. **Properties of Concrete for use in Eurocode 2.** A cement and concrete industry publication. 2007.

BAROGHEL-BOUNY, V. **Caracterization des pâtes de ciment et des bétons: methodes, analyse, interpretations.** 1994. Tese (Doutorado). L'ecole Nationale des Ponts et Chaussees, Paris, 1994.

BENTZ, D. P. Blending different fineness cements to engineer the properties of cement-based materials. **Magazine of Concrete Research,** DOI 10.1680/macr.2008.62.5.327, USA, 2010.

BENTZ, D. P. **Transient Plane Source Measurements of the Thermal Properties of Hydrating Cement Pastes.** National Institute of Standards and Technology, USA, 2007.

- CARVALHO, A. dos G. de. **Energia de Ativação dos Concretos: Experimentação e Modelagem**. Rio de Janeiro, 2002, Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.
- CASTRO, J.; MARTINS, J. G. **Reabilitação: Patologia do Betão Reparação e Reforço de Estruturas**. 1ª ed., Universidade do Porto, Portugal, 2006.
- CASCUDO, O. **Recomendações para o concreto e para a concretagem de um bloco de fundação em concreto armado do empreendimento trend office home – orientações visando à prevenção de problemas decorrentes do calor de hidratação**. Goiânia, 2014. 20 p.
- CHOKTAWEEKARN, P.; TANGTERMSIRIKUL, S. **Effect of aggregate type, casting, thickness, and curing condition on restrained strain of mass concrete**. Songklanakarin J. Sci. Technol. Thailand, 2010.
- CIFU, S.; KUPERMAN, S.C. Projeto de barragens de concreto. **Concreto & Construções**, nº 42, p. 82-89, 2006.
- COELHO, N. de A. **Um estudo numérico do efeito térmico em concreto massa**. Distrito Federal, 2012. Dissertação (Mestrado). Universidade de Brasília. UnB.
- COLLEPARDI, M. Damage by Delayed Ettringite Formation. **Concrete International**, v. 21, p. 69-74, 1999.
- COLLEPARDI, M. A state-of-the art review on delayed ettringite attack on concrete. **Cement and concrete composites**, v. 25, p. 401-407, 2003.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Manual de Inspeção de Obras de Arte Especiais**. Ministério dos Transportes; Brasília: 1994.
- DIAMOND, S. Delayed ettringite formation: processes and problems. **Cement and concrete composites**, v. 18, p. 205-215, 1996.
- FAIRBAIRN, E. M. R, TOLÊDO FILHO, R. D., SILVOSO, M. M., GUERRA, E. A. **Modelagem do concreto a poucas idades com aplicações a barragens: novos paradigmas e suas soluções**. Projeto P&D ANEEL/FURNAS/COPPE, 2003.
- FARIA, E. F.; FAIRBAIRN, E. M. R.; FILHO, R. D. T.; SILVOSO, M. M.; EVSUKOFF, A. G. **Modelo de previsão da elevação adiabática de temperatura do concreto através de redes neurais artificiais**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. COPPE/ UFRJ-PEC, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004.
- FARIAS, L.A; L, LOPES, A. N.M.; VIEIRA, F.L.; LIDUÁRIO, A.S.; STIVAL, M.L.; TRABOULSI, M.A; ANDRADE, M.A.S;PACELLI, W.A. **Relação entre os parâmetros de resistência do concreto**. In: 45º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2003, Vitória – ES.
- FURNAS, EQUIPE DE. **Concretos massa, estrutural, projetado e compactado com rolo-Ensaio e propriedades**. São Paulo: PINI, 1997. Laboratório de Concreto.
- GADJA, J.; ALSAMSAM, I. M. Engineering Mass Concrete Structures. **Structural Engineer**. Novembro, 2006.
- GADJA, J.; VANGEEM M. Controlling Temperatures in Mass Concrete. **Concrete International**. Janeiro, 2002.
- GAMBALE, E. A. **Avaliação da temperatura máxima em estruturas executadas com concreto massa** In: 57º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2015, Bonito-MS.

- GOMES, F. M. P. **Concreto nas primeiras idades: propriedades e modelagem termomecânica simplificada.** Goiânia, 2011, Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil.
- HASPARYK, N. P. **Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado.** Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2005.
- JOHANSEN, V.; THAULOW, N. **Heat curing and late formation of ettringite.** In: ERLIN, Bernard (editor). *Ettringite: the sometimes host of destruction.* Michigan, USA: American Concrete Institute, 1999, p. 47-64.
- KADRI, E. H.; DUVAL, R. **Effect of ultrafine particles on heat of hydration of cement mortars.** *ACI Materials Journal*, v.99, n. 3, p. 138-142, 2002.
- KOSMATKA, S.; KERKHOFF, B.; PANARESE, W. **Design and control of concrete mixtures.** 14th edn. Portland Cement Association, Skokie, 2003.
- KRÜGER, D.A.V. **Análise Térmica Transiente de Estruturas de Concreto Executadas por Camadas.** Curitiba, 2001, Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia.
- LEWIS, R.W.; MORGAN, K.; THOMAS, H.R.; SEETHARAMU, K.N. **The Finite Element Method in Heat Transfer Analysis.** England: John Wiley & Sons Ltd, Baffins Lane, Chichester, West Sussex PO19 1UD, 1996, 279p.
- LI, Y.; NIE, L.; WANG, B. A numerical simulation of the temperature cracking propagation process when pouring mass concrete. **Automation in Construction**, China, v.37, p. 203-210, 2014.
- LURA, P.; BREUGEL, K. **Thermal Properties of Concrete: Sensitivity studies.** IPACS Document, Subtask 2.5, 2001.
- MEHTA, P. K. MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: PINI, 2008. 573p.
- MEHTA, P. K. MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** 2.ed. São Paulo: IBRACON, 2014. 751p.
- MELO, S. K. de. **Estudo da formação da etringita tardia em concreto por calor de hidratação do cimento.** Goiânia, 2010, Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Goiás, Goiás, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Construção Civil.
- MIER, J. G. M.; VLIET, M. R. A. Uniaxial tension test for the determination of fracture parameters of concrete: state of the art. **Engineering Fracture Mechanics.** vol. 69, páginas 235-247, 2002.
- MOAVENI, S. **Finite Element Analyses: Theory and Application with ANSYS.** New Jersey: Editora Prentice-Hall, 1999.
- MORABITO, P. (1998), **Methods to determine the heat of hydration of concrete: Prevention of thermal cracking in concrete at early ages.** Report 15, R. Springenschmid, E & FN SPON, 1998.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto.** São Paulo: PINI, 1997. 828p.
- ODLER, I. **Hydration, setting and hardening of Portland cement.** In: HEWLETT, Peter C. (Editor). *Lea's chemistry of cement and concrete.* 4 ed. China: Elsevier: Butterworth Heinemann, 2007.

- ODLER, I.; GASSER, M. Mechanism of sulfate expansion in hydrated Portland cement. **Journal of the American Ceramic Society**. 1015-1020, 1988.
- OLUOKUN, F. A. Prediction of concrete tensile strength from its compressive strength: evaluation of existing relations for normal weight concrete. **ACI Materials Journal**. May-June 1991. pp. 302-309
- PAULON, V.A. **O fenômeno térmico no concreto**. São Paulo, ABCP, 48p, 1987.
- PAULON, V.A.; KUPERMAN, S.C.; **Principais fatores que influenciam as tensões de origem térmica**. In: Reunião do Ibracon - Instituto Brasileiro do Concreto, São Paulo, 1981.(Anais)
- PETRONILHO, E. SIGOLO, C. **Princípios fundamentais para projetar estruturas duráveis em concreto refrigerado**. São Paulo, 2011.
- PINTO, R. C. A. **The effect of curing temperatures on the Development of Mechanical Properties of Fresh and Hardened High-strength Silica Fume Mixtures – A Maturity Approach**. Ithaca, NY, 1997. Ph D. dissertation, Cornell University.
- REBMANN, M. S. **Durabilidade de Concretos estruturais com baixo consumo de cimento Portland e alta resistência**. São Carlos, 2011, Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil Área de Concentração em Engenharia de Estruturas.
- SANTOS, S. B. dos. **Análise da Fluência do concreto massa nas primeiras idades de carregamento: influência de aditivos plastificantes e adições mineirais**. Porto Alegre, 2011, Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
- SOUZA, R. M. de. **O método dos elementos finitos aplicado ao problema de condução de calor**. Belém, 2003. Universidade Federal do Pará, Departamento de Engenharia Civil. 40p.
- TAYLOR, H.F.W. **Cement Chemistry**. 2 ed. London: Thomas Telford, 1997. 459p.
- TAYLOR, H. F. W.; FAMY, C.; SCRIVENER, K. L. **Delayed ettringite formation**. Cement and concrete research, v. 31, p. 683-693, 2001.
- THAULOW, N.; JOHANSEN V.; JAKOBSEN U.H. **What causes Delayed Ettringite Formation?** In: Proceedings of the materials research society's. In: SCRIVENER, K. L.; YOUNG, J.F (editors). Mechanisms of chemical degradation of cement-based systems. Boston, USA: E&FN SPON,1997, p.219-226.
- TOWNSEND, C. L. **Control of Cracking in Mass Concrete Structures**. Monografia de Engenharia. The United States: Bureau of Reclamation, 1981.
- WENDLER, A. P; TURRA, C; SERIGHELI JÚNIOR, I. **Estudo da Fissuração Térmica do Concreto em Barragens**. Monografia de especialização em Patologias em Obras Civis, UTP, Curitiba, 2007.
- WILSON, E. L. The determination of temperatures within mass concrete structures. **Structural Engineering and Structural Mechanics Report NQ UCB/SESM - 68/17 p. 2**. University of California, Berkeley. USA. 1968.