



**ESTUDO DA FISSURAÇÃO DE ORIGEM TÉRMICA NO CONCRETO
MASSA DE BLOCOS DE FUNDAÇÃO**

SÃO PAULO
2012



BRUNA ESTEVES COELHO
GRAZIELLE RIBEIRO VICENTE

ESTUDO DA FISSURAÇÃO DE ORIGEM TÉRMICA NO CONCRETO MASSA DE BLOCOS DE FUNDAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Pós Graduação em Patologia das Obras Cíveis, Pós-Graduação *lato sensu*, do Instituto IDD como requisito parcial para a obtenção do Grau de Especialista em Patologia nas Obras Cíveis.

Orientador: Prof. Msc. Luís César Siqueira De Luca

SÃO PAULO
2012

AGRADECIMENTOS

Ao orientador professor Luis César Siqueira De Luca, pelas sugestões, ensinamentos transmitidos e pela valiosa colaboração para com esse trabalho.

A todos os dedicados professores do curso de Pós Graduação em Patologia das Obras Civis do Instituto IDD pela formação e ensinamentos dados.

A DESEK por ter disponibilizado o software necessário para realizarmos as simulações.

Ao Professor Selmo Chapira Kuperman e ao Engenheiro Eduardo Issamu Funahashi Jr., pelo apoio na fase de desenvolvimento do trabalho.

A todos os colegas de Pós Graduação, por compartilhar conosco suas experiências e convívio agradável.

As amigas Carla e Denise, pelas dicas preciosas e formidável amizade.

As nossas famílias, pessoas que nessa etapa nos apoiaram incondicionalmente em nossa caminhada, com palavras e gestos de amor acreditando sempre.

Agradecemos a Deus por ter nos dado força, sabedoria e persistência para concluirmos mais uma etapa.

FOLHA DE APROVAÇÃO

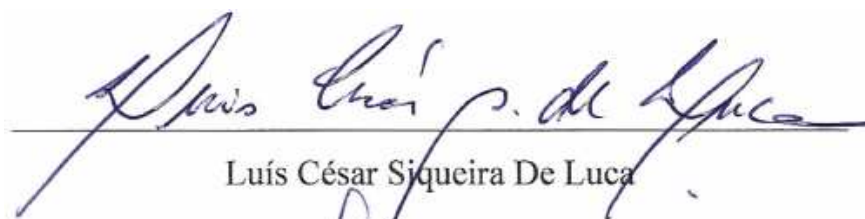
ESTUDO DA FISSURAÇÃO DE ORIGEM TÉRMICA NO CONCRETO MASSA DE BLOCOS DE FUNDAÇÃO

Por

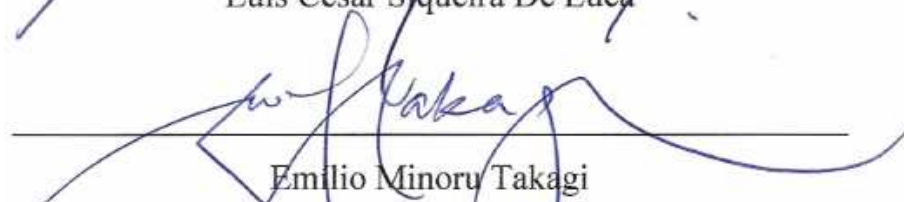
BRUNA ESTEVES COELHO
GRAZIELLE RIBEIRO VICENTE

TRABALHO APROVADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA A
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE ESPECIALISTA EM PATOLOGIA NAS
OBRAS CIVIS, DO INSTITUTO IDD, PELA COMISSÃO FORMADA PELOS
PROFESSORES A SEGUIR MENCIONADOS.

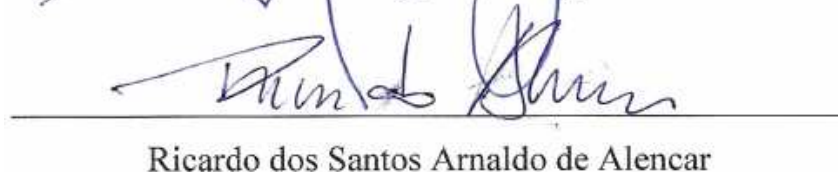
São Paulo (SP) 08 de dezembro de 2012



Luís César Siqueira De Luca



Emílio Minoru Takagi



Ricardo dos Santos Arnaldo de Alencar

RESUMO

Alguns blocos de fundação podem ser considerados como estruturas de concreto massa e requerem meios especiais para reduzir a possibilidade de fissuração. O presente trabalho simula computacionalmente, por meio do software b4cast, 24 blocos de fundação com bases quadradas, variando as larguras de 1x1 m a 8x8 m e as alturas de 1 a 3 m, com concreto de fck 30 e 35 MPa, com cimento CPIII 40, para as condições ambientais e materiais usualmente utilizados na cidade de São Paulo. A utilização do software possibilita o cálculo tridimensional das temperaturas e tensões geradas no interior das estruturas, a fim de avaliar a possibilidade de fissuração de origem térmica do concreto e determinar as condições necessárias para minimizar esta manifestação patológica. Nesse trabalho verificou-se que blocos que usualmente não seriam considerados como estrutura de concreto massa, e por isso não seriam feitos estudos específicos a fim de mitigar a fissuração de origem térmica, se mostraram propensos a esse tipo de manifestação patológica. Isso ocorreu para os blocos com volumes de concreto iguais e superiores a 50 m³, o que permite concluir que para verificar a possibilidade de ocorrência de fissuração de origem térmica não basta apenas conhecer a geometria do bloco, é necessário o conhecimento das propriedades do concreto, os materiais constituintes, condições ambientais, propriedades da fundação, propriedades das formas, condições de cura e das metodologias construtivas.

Palavras chave: fissura, concreto massa, b4cast, estudo térmico.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Grau de restrição de tração na seção central.	30
Figura 2. Regionalização dos tipos de cimento.	33
Figura 3. Localização dos pontos de estudo	50
Figura 4. Localização dos pontos no bloco 01 (1mx1mx1m).	51
Figura 5. Localização dos pontos no bloco 02 (1mx1mx2m).	51
Figura 6. Localização dos pontos no bloco 03 (1mx1mx3m).	51
Figura 7. Localização dos pontos no bloco 04 (3mx3mx1m).	52
Figura 8. Localização dos pontos no bloco 05 (3mx3mx2m).	52
Figura 9. Localização dos pontos no bloco 06 (3mx3mx3m).	52
Figura 10. Localização dos pontos no bloco 07 (5mx5mx1m).	53
Figura 11. Localização dos pontos no bloco 08 (5mx5mx2m).	53
Figura 12. Localização dos pontos no bloco 09 (5mx5mx3m).	53
Figura 13. Localização dos pontos no bloco 10 (8mx8mx1m).	54
Figura 14. Localização dos pontos no bloco 11 (8mx8mx2m).	54
Figura 15. Localização dos pontos no bloco 12 (8mx8mx3m).	54

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Influência dos compostos do cimento na geração de calor.	24
Gráfico 2. Influência da relação água / cimento no calor de hidratação.	25
Gráfico 3. Influência do consumo de cimento na elevação adiabática de temperatura – Resultados aos 28 dias para 280 observações.	26
Gráfico 4. Variação de temperatura no concreto.....	27
Gráfico 5. Determinação da relação água/cimento em função das resistências do concreto e cimento aos 28 dias.	37
Gráfico 6. Evolução do calor de hidratação do cimento CPIII 40 RS.	44
Gráfico 7. Evolução da elevação adiabática do concreto.	44
Gráfico 8. Evolução da resistência à compressão do concreto.....	47
Gráfico 9. Evolução da resistência à tração do concreto.....	48
Gráfico 10. Evolução do módulo de elasticidade do concreto.	48
Gráfico 11. Temperaturas máximas nos pontos de estudo dos blocos com alturas iguais a 1 metro (Concreto com fck igual a 30 MPa aos 28 dias).	55
Gráfico 12. Temperaturas máximas nos pontos de estudo dos blocos com alturas iguais a 2 metros (Concreto com fck igual a 30 MPa aos 28 dias).	56
Gráfico 13. Temperaturas máximas nos pontos de estudo dos blocos com alturas iguais a 3 metros (Concreto com fck igual a 30 MPa aos 28 dias).	56
Gráfico 14. Temperaturas máximas no ponto de estudo localizado a 30% da altura (Concreto com fck igual a 30 MPa aos 28 dias).	57
Gráfico 15. Temperaturas máximas no ponto de estudo localizado a 40% da altura (Concreto com fck igual a 30 MPa aos 28 dias).	57
Gráfico 16. Temperaturas máximas no ponto de estudo localizado a 50% da altura (Concreto com fck igual a 30 MPa aos 28 dias).	58
Gráfico 17. Tensões de tração máximas nos pontos de estudo dos blocos com alturas iguais a 1 metro (Concreto com fck igual a 30 MPa aos 28 dias).	59
Gráfico 18. Tensões de tração máximas nos pontos de estudo dos blocos com alturas iguais a 2 metros (Concreto com fck igual a 30 MPa aos 28 dias).	59

Gráfico 19. Tensões de tração máximas nos pontos de estudo dos blocos com alturas iguais a 3 metros (Concreto com fck igual a 30 MPa aos 28 dias).....	60
Gráfico 20. Tensões de tração máximas nos pontos de estudo localizados a 10 % da altura dos blocos (Concreto com fck igual a 30 MPa aos 28 dias).....	61
Gráfico 21. Temperaturas máximas nos pontos de estudo dos blocos com alturas iguais a 1 metro (Concreto com fck igual a 35 MPa aos 28 dias).....	62
Gráfico 22. Temperaturas máximas nos pontos de estudo dos blocos com alturas iguais a 2 metros (Concreto com fck igual a 35 MPa aos 28 dias).	62
Gráfico 23. Temperaturas máximas nos pontos de estudo dos blocos com alturas iguais a 3 metros (Concreto com fck igual a 35 MPa aos 28 dias).	63
Gráfico 24. Temperaturas máximas no ponto de estudo localizado a 30% da altura (Concreto com fck igual a 35 MPa aos 28 dias).	64
Gráfico 25. Temperaturas máximas no ponto de estudo localizado a 40% da altura (Concreto com fck igual a 35 MPa aos 28 dias).	64
Gráfico 26. Temperaturas máximas no ponto de estudo localizado a 50% da altura (Concreto com fck igual a 35 MPa aos 28 dias).	65
Gráfico 27. Tensões de tração máximas nos pontos de estudo dos blocos com alturas iguais a 1 metro (Concreto com fck igual a 35 MPa aos 28 dias).	66
Gráfico 28. Tensões de tração máximas nos pontos de estudo dos blocos com alturas iguais a 2 metros (Concreto com fck igual a 35 MPa aos 28 dias).....	66
Gráfico 29. Tensões de tração máximas nos pontos de estudo dos blocos com alturas iguais a 3 metros (Concreto com fck igual a 35 MPa aos 28 dias).....	67
Gráfico 30. Tensões de tração máximas nos pontos de estudo localizados a 10 % da altura dos blocos (Concreto com fck igual a 35 MPa aos 28 dias).....	68
Gráfico 31. Temperaturas máximas nos pontos de estudo localizados a 10 cm acima da base.....	69
Gráfico 32. Temperaturas máximas nos pontos de estudo localizados a 20 cm acima da base.....	69
Gráfico 33. Temperaturas máximas nos pontos de estudo localizados a 30 cm acima da base.....	70

Gráfico 34. Tensões de tração máximas nos pontos de estudo localizados a 10 cm acima da base.....	71
Gráfico 35. Tensões de tração máximas nos pontos de estudo localizados a 20 cm acima da base.....	71
Gráfico 36. Tensões de tração máximas nos pontos de estudo localizados a 30 cm acima da base.....	72

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Influência dos compostos do cimento Portland na geração de calor...	24
Quadro 2 Simulações realizadas para fck de 30 MPa aos 28 dias (CPIII 40).....	34
Quadro 3 Simulações realizadas para fck de 35 MPa aos 28 dias (CPIII 40).....	34
Quadro 4 Relações água/cimento dos concretos dosados pelo método ABCP....	37
Quadro 5 Abatimentos requeridos pelo método ABCP	38
Quadro 6 Consumo de água aproximado (l/m^3).	38
Quadro 7 Consumos de cimento (kg/m^3).	39
Quadro 8 Volume compactado seco de agregado graúdo por m^3 de concreto....	40
Quadro 9 Consumos dos materiais constituintes dos concretos.....	41
Quadro 10. Calor específico e condutividade térmica dos materiais.	43
Quadro 11. Calor de hidratação do cimento CPIII 40 RS.	43
Quadro 12. Balanço térmico do concreto com fck igual a 30 MPa.....	46
Quadro 13. Balanço térmico do concreto com fck igual a 35 MPa.....	46

LISTA DE EQUAÇÕES

(1) Fórmula de Rastrup.....	26
(2) Equação para determinação da difusividade térmica do concreto.....	27
(3) Equação para determinação da tensão de tração resultante do resfriamento do concreto.....	29
(4) Equação para determinação do multiplicador do grau de restrição.....	29
(5) Equação para determinação da temperatura inicial do concreto.....	31
(6) Equação para determinação da resistência à compressão do concreto requerida aos 28 dias.....	36
(7) Equação para determinação do consumo de cimento.....	39
(8) Equação para determinação do consumo de agregado graúdo.....	39
(9) Equação para determinação do volume do agregado miúdo.....	40
(10) Equação para determinação do consumo de agregado miúdo.....	41
(11) Equação para determinação do calor específico do concreto.....	42
(12) Equação para determinação do condutividade térmica do concreto.....	42
(13) Equação para determinação do coeficiente de dilatação térmica do concreto.....	45

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	3
FOLHA DE APROVAÇÃO	4
RESUMO	5
LISTA DE FIGURAS	6
LISTA DE GRÁFICOS	7
LISTA DE QUADROS	10
LISTA DE EQUAÇÕES.....	11
SUMÁRIO.....	12
1. INTRODUÇÃO	14
1.1. PROBLEMA DE PESQUISA.....	16
1.2. OBJETIVOS.....	16
1.2.1. Objetivo Geral	16
1.2.2. Objetivos Específicos	16
1.2.3. Limitações da Pesquisa	16
1.3. JUSTIFICATIVAS	17
1.3.1. Tecnológicas.....	17
1.3.2. Econômicas	17
1.3.3. Sociais	18
1.3.4. Ecológicas	18
1.4. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	19
1.5. APRESENTAÇÃO DO TRABALHO.....	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1. COMPONENTES DO CONCRETO	21
2.2. FISSURAÇÃO DE ORIGEM TÉRMICA.....	22
2.3. CONTROLE DA TEMPERATURA DO CONCRETO MASSA.....	31
3. SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS.....	33
3.1. TRAÇO	35
3.1.1. Fixação da relação água/cimento	36
3.1.2. Determinação aproximada do consumo de água do concreto....	37

3.1.3.	Determinação do consumo de cimento	39
3.1.4.	Determinação do consumo de agregado graúdo	39
3.1.5.	Determinação do consumo de agregado miúdo	40
3.1.6.	Apresentação do traço	41
3.2.	PROPRIEDADES TÉRMICAS DO CONCRETO	42
3.2.1.	Calor específico e condutividade térmica	42
3.2.2.	Calor de hidratação.....	43
3.2.3.	Elevação adiabática de temperatura	44
3.2.4.	Coeficiente de dilatação térmica	45
3.2.5.	Temperatura de lançamento do concreto fresco.....	45
3.3.	PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO	47
3.3.1.	Coeficiente de Poisson	47
3.3.2.	Resistência à compressão	47
3.3.3.	Resistência à tração	47
3.3.4.	Módulo de elasticidade.....	48
3.4.	CONDIÇÕES DE CONTORNO	49
4.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	50
4.1.	LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE ESTUDO.....	50
4.2.	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DOS BLOCOS DE CONCRETO COM RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA DE 30 MPa.....	55
4.3.	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DOS BLOCOS DE CONCRETO COM RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA DE 35 MPa.....	62
4.4.	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS.....	69
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	73
5.1.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	73
5.2.	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	75
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	76

1. INTRODUÇÃO

Neste trabalho serão analisadas as temperaturas e tensões de tração máximas para a verificação das condições necessárias para a ocorrência de fissuras de origem térmica em blocos de fundação.

Alguns blocos de fundação podem ser considerados como estruturas de concreto massa. Concreto massa é definido como qualquer volume de concreto com dimensões grandes o suficiente que requeiram meios especiais para controlar o calor gerado pela hidratação do cimento e a consequente mudança de volume, a fim de minimizar o risco de fissuração (ACI Committe 116, 2000).

De modo geral, as estruturas construídas com grandes volumes de concreto e que possuem um consumo de cimento elevado são mais suscetíveis ao aparecimento de fissuras de origem térmica. Quando o gradiente de temperatura do concreto é elevado, este é submetido a altas tensões, que dependendo dos seus valores pode ultrapassar a resistência do concreto e provocar o aparecimento do quadro fissuratório.

De acordo com Pereira e Kuperman (2008), o conhecimento das propriedades térmicas, mecânicas e elásticas do concreto massa é de fundamental importância no projeto das estruturas.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), popularmente é comum considerar que a composição e as propriedades do concreto massa interessam somente aqueles que estão envolvidos no projeto e construção de barragens. No entanto, muitas práticas de construção desenvolvidas durante um grande período na construção de grandes barragens são aplicáveis a estruturas bem mais esbeltas, como é o caso de estacas de concreto, pilares, muros e fundações de grandes estruturas.

Tais estruturas são consideravelmente menores se comparadas a uma barragem de gravidade típica de concreto, porém, se os elementos possuírem elevada espessura e forem feitos de concreto com alta resistência, o problema de fissuração térmica pode ser tão sério quanto nas barragens.

O cimento é o material responsável por provocar reações exotérmicas que se adicionado em grande quantidade ao concreto gera muito calor. Em estruturas de concreto massa a dissipação de calor é prejudicada devido às suas dimensões e isto contribui para que as temperaturas no interior destas estruturas sejam elevadas.

A principal característica que distingue as estruturas de concreto massa das demais é o comportamento térmico.

Alguns fatores podem contribuir para a elevação de temperatura do concreto no estado plástico, como a altura das camadas de concretagem, a temperatura de lançamento do concreto fresco, a utilização de cimentos com alto calor de hidratação, o consumo elevado de cimento, as condições de cura, as condições ambientais da região da obra, as propriedades térmicas dos agregados e das formas e o intervalo de lançamento entre camadas sucessivas de concreto.

A análise térmica das estruturas massivas pode ser feita por meio de estudos térmicos realizados com a utilização de softwares. Os estudos térmicos são feitos para que se possa verificar o comportamento térmico do concreto no interior da estrutura estudada, de modo a analisar as tensões e temperaturas atingidas. A análise dos resultados obtidos por meio dos softwares possibilita a verificação da necessidade de mudanças nos métodos construtivos com o objetivo de minimizar o aparecimento de fissuras.

As fissuras são manifestações patológicas que possibilitam a penetração de agentes agressivos nas estruturas, dessa forma as mesmas precisam ser evitadas, de modo a aumentar a durabilidade e vida útil das peças.

Por estas razões são realizados estudos térmicos com o propósito de planejar o modo mais satisfatório para a execução de estruturas massivas. Nestes estudos consideram-se as condições de lançamento do concreto, a dosagem, as propriedades dos materiais, a prática da cura e as condições ambientais da região, visto que todas estas variáveis impactam diretamente nas variações de temperaturas e tensões existentes no concreto.

1.1. PROBLEMA DE PESQUISA

Quais as condições necessárias para o aparecimento de fissuras de origem térmica em blocos de fundação?

1.2. OBJETIVOS

Aqui serão mencionados os objetivos gerais e específicos do presente trabalho.

1.2.1. Objetivo Geral

Determinar, através de simulações computacionais, as condições necessárias para a ocorrência de fissuras de origem térmica em blocos de fundação.

1.2.2. Objetivos Específicos

Calcular as temperaturas e as tensões de tração máximas no centro de blocos de fundação de bases quadradas, variando de 1x1m a 8x8 m, com alturas variando de 1 a 3 m, com concretos de fck 30 e 35 MPa, com cimento CPIII 40, para as condições ambientais e materiais usualmente utilizados na cidade de São Paulo

1.2.3. Limitações da Pesquisa

Serão estudados apenas blocos com base quadrada, variando de 1x1m a 8x8m, alturas variando de 1 a 3m, concreto com fck de 30 e 35MPa, com cimento CPIII 40 e para as condições ambientais da cidade de São Paulo.

1.3. JUSTIFICATIVAS

Estruturas de concreto massa são passíveis de atingir temperaturas muito elevadas devido à dificuldade de dissipação de calor do interior para o meio externo. Quando a temperatura atingida pela estrutura é muito elevada é comum o aparecimento de fissuras. Para evitar que as fissuras prejudiquem a durabilidade e a segurança é preciso que sejam feitos estudos térmicos em estruturas de concreto massa, principalmente.

1.3.1. Tecnológicas

O avanço da tecnologia permite que os estudos térmicos sejam realizados em um curto intervalo de tempo com o uso de programas de computadores. O software b4cast permite calcular a evolução da temperatura e da tensão em qualquer parte da estrutura a qualquer idade.

O b4cast é um software baseado no método dos elementos finitos e foi criado por Erik Steen Pedersen e a empresa Con Tech Analysis ApS. O nome b4cast vem do termo em inglês “before cast”, que significa “antes de concretar”. Segundo Pedersen (2009, p. 4), este software possibilita descrever a estrutura tridimensionalmente e simular diferentes métodos de construção, a fim de obter uma solução ótima em matéria de qualidade, tempo e dinheiro.

1.3.2. Econômicas

As elevadas temperaturas no concreto podem gerar tensões de tração elevadas, visto que estes fatores estão diretamente relacionados. Para que isto não aconteça, muitas vezes é necessário refrigerar o concreto, aumentar o intervalo de lançamento entre as camadas de concretagem ou diminuir a espessura das camadas para que a dissipação de calor seja facilitada. Estas medidas encarecem a obra e algumas vezes fazem com que o cronograma da obra seja modificado, aumentando o prazo da mesma. Os procedimentos necessários para garantir a

durabilidade e segurança da estrutura são determinados por meio da análise dos resultados obtidos nos estudos térmicos.

A não utilização de estudos térmicos pode fazer com que nas estruturas de concreto massa não sejam utilizados os métodos construtivos mais adequados, além disso, caso sejam verificados quadros fissuratórios na estrutura após a sua construção é preciso que sejam feitos reparos ou reforços estruturais, o que encarece muito as obras visto que as medidas corretivas nestas estruturas representam gastos elevados. De acordo com Magalhães et al. (2006, p. 2), “O efeito escala e o alto custo da recuperação estrutural de estruturas precocemente deterioradas, entretanto, é justificativa mais que suficiente para um avanço na qualidade das pesquisas ligadas a esses materiais.”. De modo a evitar gastos excessivos durante e após a construção das estruturas de concreto massa, são realizados estudos térmicos.

1.3.3. Sociais

A utilização de softwares que realizam os estudos térmicos permite verificar os possíveis problemas estruturais relacionados à fissuração de origem térmica. De acordo com Kavamura (2005), o controle da qualidade das estruturas deve ser feito, pois a funcionalidade e a durabilidade das mesmas são fortemente afetadas por danos estruturais indesejáveis como o aparecimento de fissuras. É preciso aproveitar as tecnologias disponíveis para a verificação do comportamento do concreto de modo a evitar futuros problemas e gastos excessivos com a recuperação das estruturas e grandes desastres com os clientes.

1.3.4. Ecológicas

Além das modificações dos métodos construtivos, a modificação das quantidades dos materiais pode contribuir para a redução da possibilidade de fissuração das estruturas. A diminuição da quantidade de clínquer no cimento, ou seja, a utilização de cimentos com adições é importante para reduzir os riscos de

fissuração, devido à redução do calor gerado. Além de aumentar a segurança da obra, a redução de clínquer na fabricação do cimento pode ser benéfica economicamente, visto que o clínquer é um material que possui um custo elevado, e também ecologicamente, pois a queima do clínquer é altamente poluente. De acordo com Belie, Grosse e Baert (2008) o uso de cinzas volantes no concreto pode ajudar a reduzir o efeito estufa, pois cerca de 7% de todo dióxido de carbono produzido é liberado na produção de cimento Portland. De modo geral, a diminuição da quantidade de aglomerante no concreto traz muitos benefícios, porém é necessário estudar a influência desta ação nas propriedades do concreto e garantir que essa redução não prejudique sua qualidade.

1.4. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Proceder uma ampla revisão bibliográfica sobre o concreto massa e a fissuração de origem térmica.

Simular computacionalmente blocos de fundação, utilizando o software b4cast, variando as propriedades do concreto, os procedimentos construtivos e a geometria das estruturas de modo a definir as condições necessárias para o aparecimento de fissuras de origem térmica.

1.5. APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

O **Capítulo 1** apresenta o problema de pesquisa e seus objetivos, bem como delinea as principais justificativas para a realização deste estudo e os procedimentos metodológicos a serem adotados.

O **Capítulo 2** apresenta a revisão bibliográfica e discorre sobre as propriedades do concreto massa, os mecanismos de formação das fissuras de origem térmica e os procedimentos utilizados para mitigação desta manifestação patológica em estruturas massivas.

O **Capítulo 3** trata sobre os estudos térmicos realizados neste trabalho, apresentando as variáveis utilizadas nos cálculos.

O **Capítulo 4** apresenta os resultados dos estudos térmicos e a análise dos mesmos.

O **Capítulo 5** apresenta as considerações finais acerca da pesquisa e as recomendações para trabalhos futuros.

O presente capítulo tratou sobre os aspectos fundamentais do trabalho, desde o seu problema de pesquisa até a apresentação do mesmo. Já o capítulo seguinte apresentará a revisão bibliográfica que servirá de argumento para as análises computacionais.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O capítulo anterior expos a temática que versará o presente trabalho, mostrando os principais objetivos do mesmo e contextualizando a importância do assunto abordado.

Esse capítulo apresenta uma ampla revisão bibliográfica sobre o tema em estudo, os materiais utilizados, o concreto massa e os problemas térmicos do concreto; que servirão de embasamento para a realização das simulações computacionais apresentadas no capítulo 3.

O concreto massa é caracterizado por apresentar elevadas temperaturas e conseqüentemente ser mais suscetível ao aparecimento de fissuras de origem térmica. Estas características estão relacionadas ao volume de concreto que por sua vez contribuem para a dificuldade de dissipação de calor e para a obtenção de elevadas temperaturas. Quando o concreto é submetido a elevadas temperaturas, as tensões de tração tendem a serem maiores devido ao elevado gradiente de temperatura do concreto. O gradiente de temperatura do concreto é determinado pela diferença entre a temperatura máxima e a temperatura de estabilização, que coincide com a temperatura média ambiente.

2.1. COMPONENTES DO CONCRETO

Segundo Alves (2002), a quantidade de calor produzida num volume unitário de concreto depende do tipo de cimento e do consumo dele no traço. A velocidade de geração do calor depende das características dos agregados, da temperatura inicial do concreto e do tipo de cimento.

Cada tipo de cimento tem influência diferente no resultado da argamassa ou do concreto, afetando suas propriedades. Caso seja possível, para minimizar os efeitos térmicos no concreto, utiliza-se cimento de baixo calor de hidratação (CPIII e CPIV), agregados com propriedades térmicas convenientes (condutividade térmica, calor específico e coeficiente de dilatação), baixo

consumo de cimento e a adoção de procedimentos que permitam a redução das temperaturas no interior das estruturas.

É necessário entender a contribuição de cada material na temperatura do concreto fresco. A quantidade de cada material na mistura e seu calor específico são variáveis que determinarão a temperatura inicial do concreto fresco (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 1999). Segundo Silva e Battagin (2012), o cimento ocupa cerca de 7% a 15% do volume total, enquanto a água de amassamento e os agregados ocupam cerca de 70% a 90% do volume do concreto.

Outra variável conhecida é o calor específico de cada componente. O cimento e os agregados apresentam baixo calor específico, aproximadamente 0,92 kJ/kg.K, enquanto a água apresenta um calor específico muito mais alto, 4,184 kJ/kg.K. Isso significa que a água pode armazenar calor, enquanto o cimento e os agregados podem dissipar o calor rapidamente (SILVA; BATTAGIN, 2012).

Segundo Lerch (1955) para baixar a temperatura do concreto em apenas 1°C, a temperatura do cimento deve ser reduzida em 8,2°C, ou deve-se diminuir a temperatura da água em 4,9 °C, ou ainda reduzir a temperatura dos agregados em 1,5 °C. Isto mostra claramente que a influência da temperatura do cimento na temperatura global do concreto é muito menor que a do agregado e da água.

2.2. FISSURAÇÃO DE ORIGEM TÉRMICA

De acordo com Marcelli (2007), a variação de temperatura provoca uma variação dimensional nas estruturas de concreto, de modo semelhante a variações de umidade, sendo que a somatória desses dois fenômenos pode resultar em deformações que, se a peça estiver impedida de se movimentar, vão gerar tensões elevadas e consequentemente fissuras.

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. A expansão do concreto ocorre até o instante em que a temperatura máxima é atingida. Com base nas propriedades do concreto é possível calcular a temperatura máxima a que o concreto estará submetido.

Para a determinação das propriedades térmicas do concreto utilizado nas estruturas em estudo é necessário realizar ensaios, porém nas fases iniciais do projeto isto normalmente não ocorre, assim algumas destas propriedades podem ser determinadas com base em bibliografias e nas características dos materiais utilizados na produção do concreto.

O calor de hidratação é definido como a energia liberada por unidade de massa de cimento. O conhecimento do calor de hidratação do cimento a ser utilizado na estrutura é fundamental para a determinação do calor produzido e das temperaturas atingidas pela estrutura.

A determinação do calor de hidratação pode ser feita através de dois ensaios. O primeiro é o ensaio do calor de dissolução realizado com a utilização de um calorímetro e o segundo é feito com a utilização da garrafa de Langavant.

O ensaio mais utilizado para determinação do calor de hidratação é o método da garrafa de Langavant, cuja especificação consta da Norma Brasileira NBR 12006 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1990).

As reações de hidratação do cimento Portland são exotérmicas, sendo as quantidades de calor liberadas pelos compostos do cimento mostradas no Quadro 1.

COMPOSTO QUÍMICO	CALOR LIBERADO (cal/g) NAS IDADES			
	7 DIAS	28 DIAS	6 MESES	TOTAL
C ₃ S (silicato tricálcico)	110	120	120	120
C ₂ S (silicato bicálcico)	20	45	60	62
C ₃ A (aluminato tricálcico)	185	205	207	207
C ₄ AF (ferro aluminato tetracálcico)	40	50	70	100

Quadro 1. Influência dos compostos do cimento Portland na geração de calor.

Fonte: Adaptado de Priszkulnik (1985, p.8)

Para melhor visualizar a influência dos compostos na geração de calor do cimento Portland, pode-se analisar o Gráfico 1 que apresenta os valores do Quadro 1.

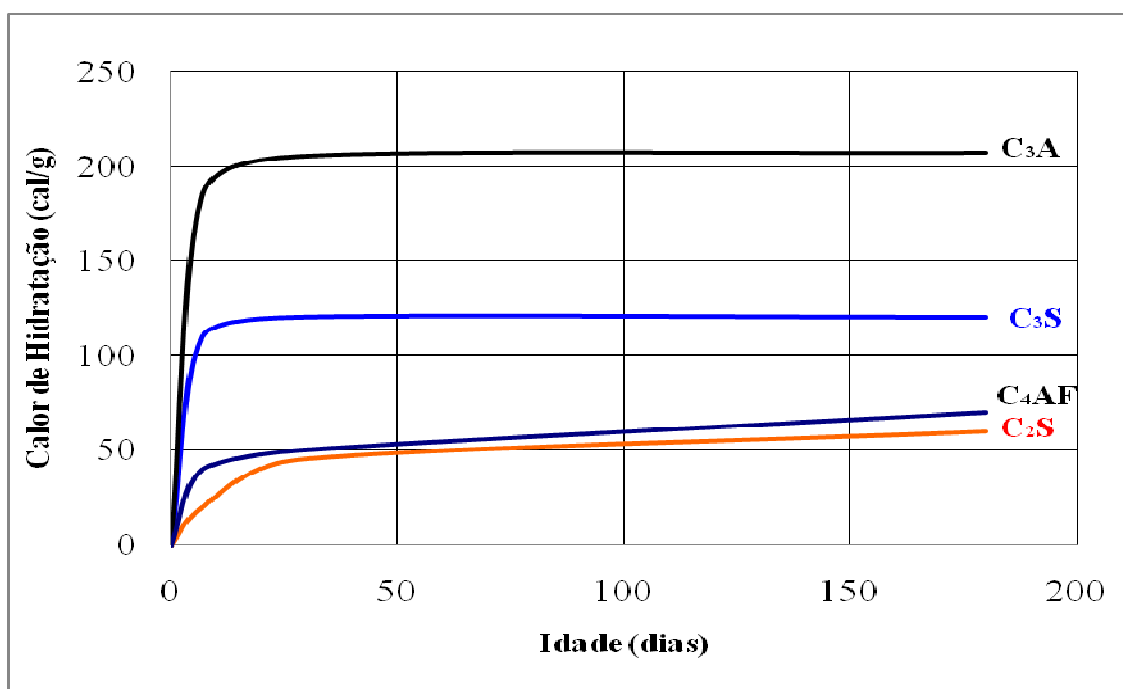


Gráfico 1. Influência dos compostos do cimento na geração de calor.

Fonte: Acervo pessoal

O composto químico que libera calor mais rapidamente e em maior quantidade é o C₃A e posteriormente o C₃S. Assim, o cimento Portland de baixo calor de hidratação deve conter o maior teor de C₂S e menores teores de C₃A e C₃S.

O calor de hidratação depende do tipo de cimento, porém existem outras propriedades térmicas que dependem das propriedades e quantidades dos materiais utilizados na composição dos concretos, argamassas ou pastas. De

acordo com Wendler, Turra e Serigheli Junior (2007), as propriedades térmicas do concreto são determinadas pelo coeficiente de expansão térmica, pela elevação adiabática de temperatura e pela difusividade. O coeficiente de expansão ou dilatação térmica do concreto é a relação entre a variação de comprimento linear ou volumétrica pela variação unitária de temperatura, sua determinação é feita através da média ponderada dos consumos de materiais e seus respectivos coeficientes de dilatação térmica.

De acordo com Ern e Helene (2003), a relação água / cimento também influencia o calor de hidratação, conforme apresentado no Gráfico 2.

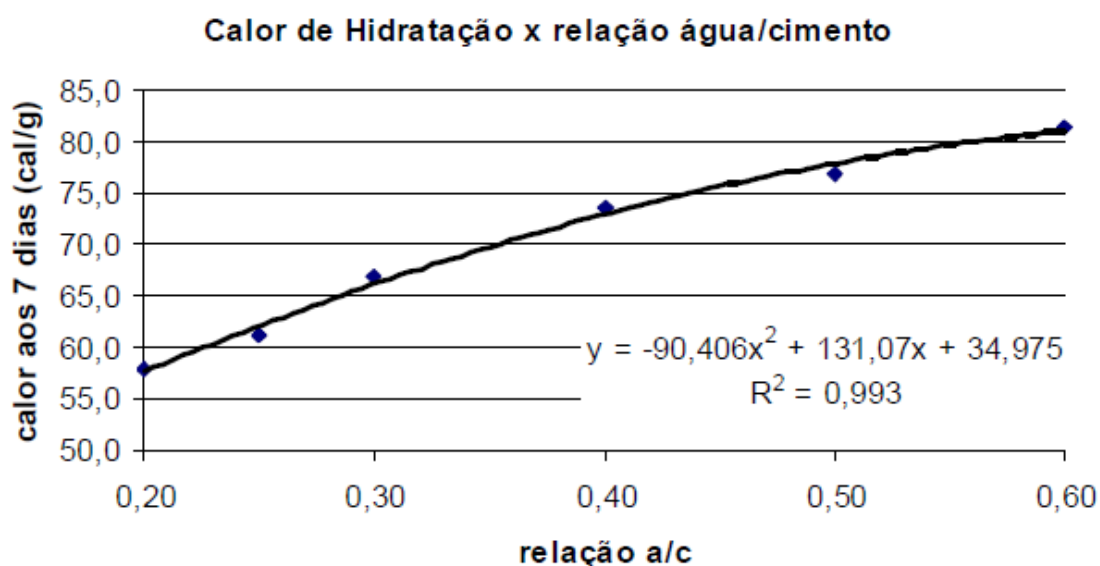


Gráfico 2. Influência da relação água / cimento no calor de hidratação.

Fonte: Ern e Helene (2003, p. 21)

A elevação adiabática de temperatura do concreto é entendida como o calor gerado no interior da estrutura, sem troca com o ambiente. A alteração do consumo de cimento, entre outros fatores, influencia na elevação de temperatura do concreto, conforme observados no Gráfico 3.

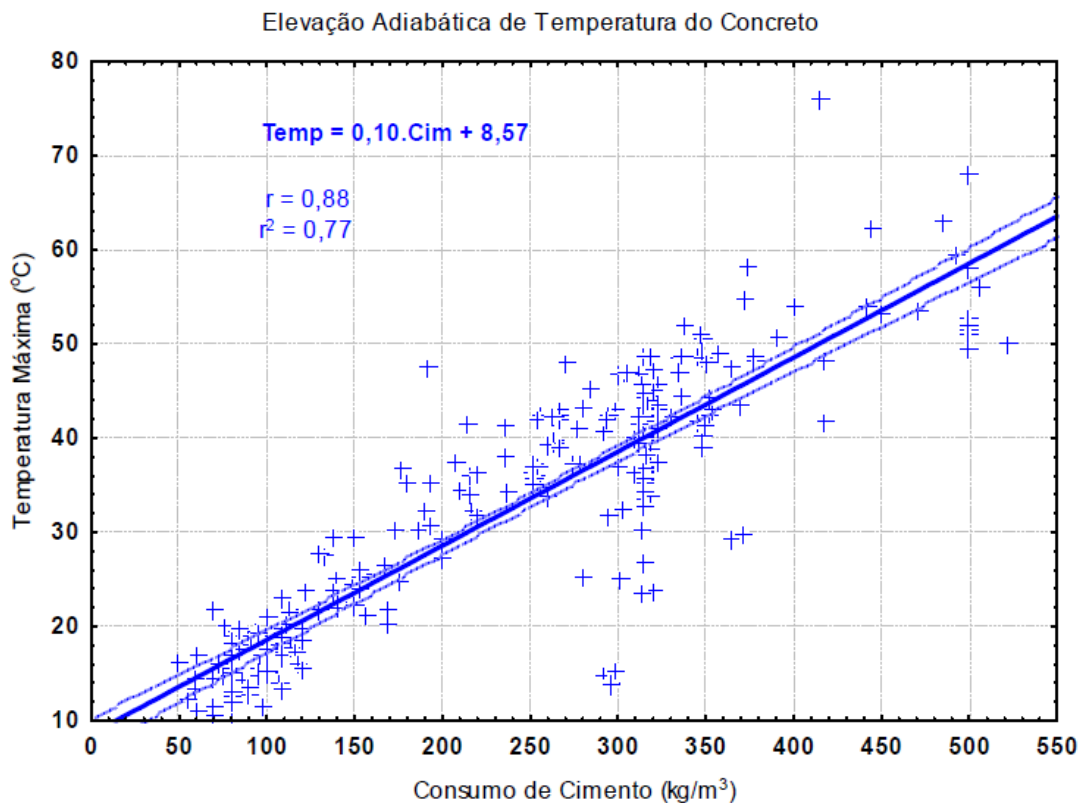


Gráfico 3. Influência do consumo de cimento na elevação adiabática de temperatura – Resultados aos 28 dias para 280 observações.

Fonte: Gambale et al. (2010, p. 11)

De acordo com Gambale et al. (2010), a grande variedade de tipos de cimento empregados (CPII-F, CPII-Z, CPII-E, CPIII, CPIV e CPV) e os diferentes teores de adições minerais (escória de alto-forno ou pozolana) empregados na fabricação dos cimentos CPIII e CPIV, entre outros fatores, justificam a dispersão dos resultados apresentados no Gráfico 3. Portanto, um mesmo consumo de cimento pode resultar em diferentes elevações adiabáticas.

A determinação da elevação adiabática de temperatura do concreto pode ser feita através de ensaios laboratoriais cujo método é especificado pela NBR 12819 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1993) ou calculada em função do calor de hidratação, da massa específica, do consumo de cimento e do calor específico do concreto, através da fórmula de Rastrup apresentada na Equação 1.

$$\Delta T = \frac{CH.C}{\lambda.c} \quad (1)$$

sendo:

ΔT - elevação adiabática (°C);

CH - o calor de hidratação do cimento (kJ/kg);

C - o consumo de cimento (kg/m³);

λ - a massa específica (kg/m³);

c - o calor específico (kJ/kg°C).

A partir do instante em que o concreto atinge a temperatura máxima começa a ocorrer o seu resfriamento e consequente contração. O concreto tende a voltar à sua forma inicial e assim as tensões de compressão são reduzidas, podendo originar tensões de tração. O resfriamento do concreto ocorre até a estabilização da temperatura, ou seja, até o instante em que o concreto atinge a temperatura ambiente, conforme apresentado no Gráfico 4.

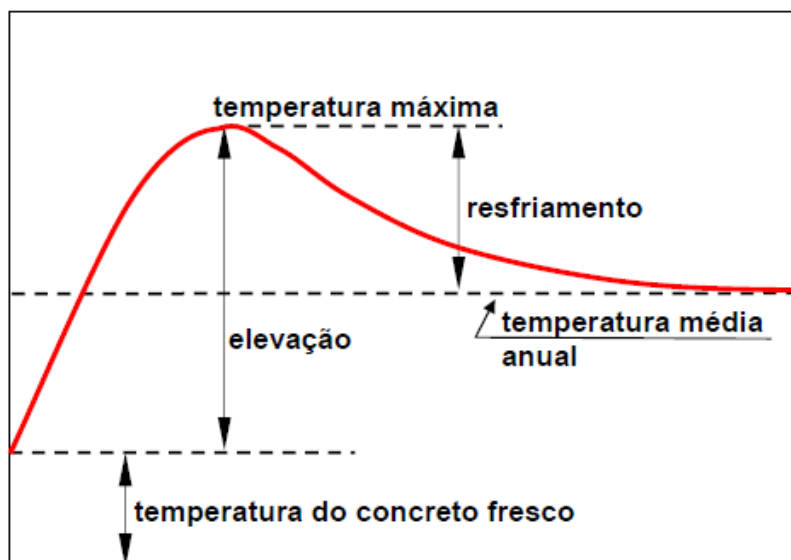


Gráfico 4. Variação de temperatura no concreto

Fonte: Marques Filho (2005, apud WENDLER; TURRA E SERIGHELI JUNIOR, 2007, p. 19)

A difusividade térmica do concreto é entendida como a velocidade de dissipação de calor da estrutura para o meio externo e, de acordo com Wendler, Turra e Serigheli Junior (2007), depende do tipo e da dimensão máxima do agregado. Segundo Mehta e Monteiro (2008), a difusividade térmica do concreto pode ser calculada através da razão entre a condutividade e o produto do calor específico e da densidade do concreto, como mostra a Equação 2.

$$\kappa = \frac{K}{c \cdot \rho} \quad (2)$$

onde:

κ - difusividade térmica (m^2/dia);

K - condutividade térmica (J/m.s.K);

c - calor específico (J/kg.K);

ρ - densidade (kg/m^3).

Além do calor de hidratação, da elevação adiabática e da difusividade térmica, o coeficiente de dilatação térmica, o calor específico e a condutividade térmica também são responsáveis pelas propriedades térmicas do concreto.

O coeficiente de dilatação térmica dos agregados apresenta grande influência na dilatação do concreto. De acordo com Prizskulnik (1978), o concreto apresenta em sua composição cerca de 65 a 80% de agregados e o módulo de deformação da rocha é cerca de cinco vezes maior que o da pasta endurecida, por este motivo a dilatação resultante do concreto é influenciada, principalmente, pela dilatação térmica dos agregados. O coeficiente de dilatação dos agregados varia em função do tipo petrográfico e do teor de umidade da rocha.

O coeficiente de dilatação térmica corresponde a uma deformação causada pela variação de temperatura, portanto quanto maior a temperatura do concreto maior é a variação de volume e maior a possibilidade de fissuração. De modo a evitar que o concreto seja fissurado e comprometa suas propriedades, o coeficiente de dilatação térmica do agregado não pode ser muito inferior ao da pasta. De acordo com Coutinho (1973), não convém utilizar agregados com coeficiente de dilatação térmica inferior a cerca $5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. O coeficiente de dilatação térmica dos agregados é determinado através de ensaios laboratoriais.

O calor específico corresponde à quantidade de calor necessária para elevar uma unidade de temperatura de um corpo com uma unidade de massa e é determinado através de ensaios laboratoriais.

A condutividade térmica é a facilidade que o material tem de conduzir o calor e é determinada pela quantidade de fluxo de calor transmitido em uma unidade de área sob um gradiente de temperatura unitário. O calor gerado pelo cimento tende a se dissipar através dos materiais utilizados na composição do concreto, argamassa ou pasta. No caso dos concretos e argamassas, a

condutividade térmica do agregado influencia nesta dissipação e por este motivo deve ser conhecida. Sua determinação é feita por meio de ensaios laboratoriais.

A determinação do calor específico e da condutividade térmica do concreto pode ser feita através da média ponderada entre os consumos dos materiais e os valores de calor específico e condutividade térmica dos materiais utilizados, respectivamente.

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 3.

$$\sigma_t = Kr.[E/(1 + \varphi)].\alpha.\Delta T \quad (3)$$

onde:

σ_t - tensão de tração;

Kr - grau de restrição;

E - módulo de elasticidade;

φ - coeficiente de fluência;

α - coeficiente de expansão térmica;

ΔT - variação de temperatura.

Quando se tratar de uma fundação não rígida, o ACI-207.2R recomenda multiplicadores para Kr , conforme Equação 4.

$$multiplicador = 1 / \{1 + [(A_g.E)/(A_f.E_f)]\} \quad (4)$$

onde:

A_g - área total da seção transversal do concreto;

A_f - área da fundação ou outro elemento restritivo (para o maciço de rocha, pode assumir que A_f seja 2,5. A_g);

E_f - módulo de elasticidade da fundação ou elemento restritivo;

E - módulo de elasticidade do concreto.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), 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. No caso de fundação rígida, há restrição total na interface concreto rocha ($K_r = 1,0$) e à medida que aumenta a distância em relação à base, a restrição diminui, como apresentado na Figura 1.

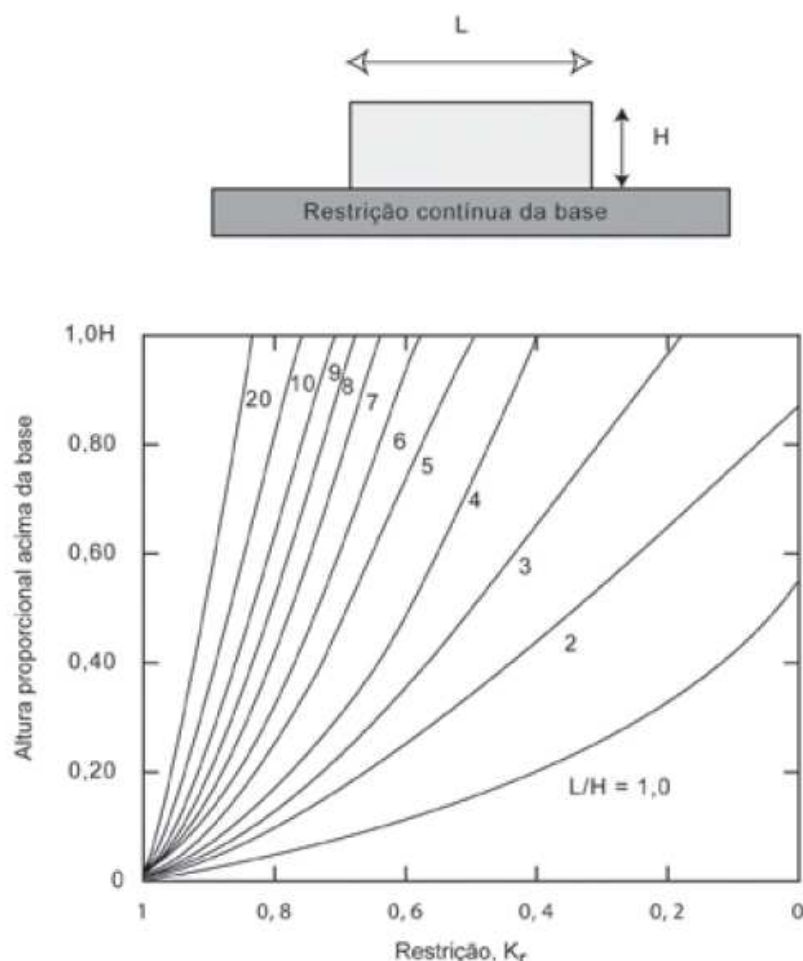


Figura 1. Grau de restrição de tração na seção central.

Fonte: ACI Committee 207 (1998, apud MEHTA e MONTEIRO, 2008, p. 111)

Segundo Marcelli (2007), nas construções novas e mesmos nas antigas nota-se uma falta de preocupação por parte dos projetistas em querer minimizar os efeitos danosos da variação de temperatura, que por sua vez atinge as edificações. Para Ern e Helene (2003), nos projetos atuais é importante considerar, entre outros fatores, o consumo de cimento, a influência da relação água/cimento, a temperatura de lançamento, o choque térmico, o resfriamento gradual e os gradientes térmicos.

Caso estes fatores não sejam considerados no projeto, a possibilidade de ocorrência de fissuração de origem térmica nas estruturas é maximizada e estas podem necessitar de ações corretivas, que no caso de estruturas massivas,

são onerosas. Portanto, para reduzir os problemas e os gastos com a obra é importante que sejam realizados estudos para minimização desta manifestação patológica.

2.3. CONTROLE DA TEMPERATURA DO CONCRETO MASSA

De acordo com Alves (2002), as principais técnicas construtivas para minimizar os efeitos térmicos são: subdivisão de camadas com espessuras menores, construção de juntas verticais de resfriamento, aumento de intervalos de tempo de lançamentos consecutivos e uso de equipamentos especiais, tais como, refrigerador do concreto fresco, rede de tubos com circulação de água refrigerada e recobrimento das superfícies das camadas com material isolante.

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), controlar a temperatura de lançamento do concreto é uma das melhores formas de se evitar fissuração térmica. O ACI 207.4R sugere a Equação 5 para o cálculo da temperatura inicial do concreto:

$$T_i = T_f + C / (\alpha \cdot Kr) - T_r \quad (5)$$

onde:

T_i - temperatura de lançamento do concreto;

T_f - temperatura estável final do concreto;

C - capacidade de deformação por tração do concreto;

α - coeficiente de expansão térmica;

Kr - grau de restrição;

T_r - aumento inicial de temperatura do concreto.

Ou seja, segundo o ACI 207.4R, a temperatura de lançamento deve ser tal que a deformação por tração do concreto, causada pela queda de temperatura, não exceda a capacidade de deformação por tração do concreto.

De acordo com Watanabe (2008) “Duas práticas de construção são usadas no controle do aumento da temperatura em estruturas de concreto de

grande volume: a pré-refrigeração ou pré-resfriamento e a pós-refrigeração ou pós-resfriamento.”.

Segundo Watanabe (2008), a pré-refrigeração consiste na refrigeração dos agregados graúdos, uso de água gelada e gelo na fabricação do concreto. De modo geral, quanto mais baixa a temperatura do concreto ao passar da fase plástica para a fase elástica, menor a tendência de fissuração. Um dos principais benefícios da pré-refrigeração do concreto massa é a possibilidade de redução de cerca de 0,3% no consumo de cimento para cada grau centígrado de redução da temperatura de lançamento do concreto. O primeiro uso de pré-refrigeração dos materiais do concreto para reduzir a temperatura do concreto massa foi feito durante a construção da barragem de Norfolk, na década de 40. Uma parte da água de amassamento sob a forma de gelo foi introduzida no concreto atingindo a temperatura de aproximadamente 6°C no estado fresco. Mais tarde, combinações de gelo picado, água de amassamento gelada e agregados resfriados foram utilizados em diversas construções.

Segundo Watanabe (2008), a pós-refrigeração é efetuada pela passagem de água gelada ou ar frio em tubulações deixadas embutidas no concreto. O primeiro maior uso da pós-refrigeração do concreto em obra foi na construção da barragem de Hoover nos anos 30. O resfriamento foi conseguido com a circulação de água fria em tubos de aço com paredes finas mergulhadas no concreto.

Este capítulo consistiu numa revisão bibliográfica dos assuntos inerentes a temática do trabalho, abordando os componentes do concreto, as definições de concreto massa, as fissurações de origem térmica e o controle de temperatura do concreto massa. Este conhecimento foi necessário para a realização das simulações computacionais dos blocos de fundação apresentadas no próximo capítulo.

3. SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

O capítulo anterior apresentou uma revisão bibliográfica sobre os assuntos tratados neste trabalho.

Neste capítulo serão definidas as características dos blocos de fundação utilizados nas simulações computacionais, como traços, geometrias, alturas e as devidas propriedades ambientais.

Para determinar as condições necessárias para o aparecimento de fissuras em blocos de fundação decidiu-se simular computacionalmente blocos de fundação com geometria variável e concreto com propriedades distintas.

Com base em verificações de projetos de blocos de fundação de concreto executados atualmente notou-se que a resistência característica do concreto à compressão (f_{ck}) especificada na maioria dos casos é de 35 MPa aos 28 dias, desta forma, decidiu-se realizar estudos térmicos considerando concretos com f_{ck} de 30 e 35 MPa aos 28 dias.

As geometrias dos blocos foram variadas considerando seções quadradas e alturas variáveis. Os tipos de cimento foram variados com base nos produtos mais utilizados em São Paulo. A Figura 2 apresenta a distribuição regional de alguns tipos de cimento em função da matéria-prima disponível.



Figura 2. Regionalização dos tipos de cimento.

Fonte: Munhoz (2012).

Na região de São Paulo verifica-se que a escória de siderúrgica encontra-se disponível, portanto, decidiu-se utilizar o Cimento Portland de Alto-Forno (CPIII) nas simulações. Com base nas resistências características do concreto à compressão (f_{ck}) escolhidas decidiu-se escolher a classe de resistência do cimento 40, portanto, o tipo de cimento utilizado nas simulações é o CPIII 40.

O Quadro 2 apresenta as simulações realizadas para concreto com f_{ck} de 30 MPa aos 28 dias e cimento CPIII 40.

Simulação	Largura x Comprimento (m)	Altura (m)
Bloco 01	1x1	1
Bloco 02		2
Bloco 03		3
Bloco 04	3x3	1
Bloco 05		2
Bloco 06		3
Bloco 07	5x5	1
Bloco 08		2
Bloco 09		3
Bloco 10	8x8	1
Bloco 11		2
Bloco 12		3

Quadro 2 Simulações realizadas para f_{ck} de 30 MPa aos 28 dias (CPIII 40)

O Quadro 3 apresenta as simulações realizadas para concreto com f_{ck} de 35 MPa aos 28 dias e cimento CPIII 40.

Simulação	Largura x Comprimento (m)	Altura (m)
Bloco 13	1x1	1
Bloco 14		2
Bloco 15		3
Bloco 16	3x3	1
Bloco 17		2
Bloco 18		3
Bloco 19	5x5	1
Bloco 20		2
Bloco 21		3
Bloco 22	8x8	1
Bloco 23		2
Bloco 24		3

Quadro 3 Simulações realizadas para f_{ck} de 35 MPa aos 28 dias (CPIII 40)

Após a definição dos modelos a serem simulados é necessário estabelecer os traços para iniciar as simulações.

3.1. TRAÇO

Segundo Tutikian e Helene (2011), traço é o estudo de dosagem dos concretos, ou seja, o proporcionamento dos materiais, procedimento este, necessário para a obtenção da melhor proporção entre os materiais constitutivos do concreto. Devemos considerar os seguintes materiais em um estudo de dosagem: os vários cimentos, os agregados miúdos, os agregados graúdos, a água, o ar incorporado, o ar aprisionado, os aditivos, as adições, os pigmentos e as fibras.

Segundo Mehta e Monteiro (2008,) qualquer estudo de dosagem dos concretos tem fundamentos científicos e tecnológicos fortes, mas sempre envolve uma parte experimental em laboratório e /ou campo, o que faz com que certos pesquisadores e profissionais considerem a dosagem do concreto mais como uma arte do que uma ciência.

Um dos propósitos da dosagem é obter um produto que tenha um desempenho que atenda a certos requisitos previamente estabelecidos, sendo a trabalhabilidade do concreto fresco e a resistência do concreto endurecido a uma idade definida, os requisitos normalmente mais importantes.

O objetivo amplo do proporcionamento do concreto pode então ser resumido como a escolha dos materiais mais adequados entre aqueles disponíveis e a determinação da combinação mais econômica desde que produza um concreto que atenda a certas características de desempenho mínimo.

Para a obtenção dos traços utilizados nas simulações dos blocos de fundação de concreto foi utilizado o método ABCP, que segundo Tutikian e Helene (2011), representa uma versão adaptada, atualizada, moderna, simples e objetiva do método de dosagem americano, descrito no ACI 211. Segundo

Rodrigues (2005), para utilizar este método de dosagem é necessário ter conhecimento prévio das seguintes informações:

- tipo, massa específica e nível de resistência aos 28 dias do cimento a ser utilizado;
- análise granulométrica e massa específica dos agregados disponíveis;
- massa unitária compactada do agregado graúdo;
- dimensão máxima característica admissível;
- consistência desejada do concreto fresco medida pelo abatimento do tronco de cone;
- condições de exposição ou finalidade da obra;
- resistência de dosagem do concreto.

Com estas informações é possível determinar a dosagem do concreto seguindo os procedimentos descritos a seguir.

3.1.1. Fixação da relação água/cimento

De acordo com a NBR 6118 a classe de agressividade ambiental considerada para o meio urbano é a classe II, portanto, para o concreto armado, objeto deste estudo, a relação água/cimento (a/c) máxima é 0,60.

De acordo com Rodrigues (2005), a escolha da relação a/c em função da resistência mecânica do concreto deve ser feita com base na Curva de Abrams do cimento a ser utilizado, porém quando isso não for possível, pode-se empregar o Gráfico 5.

O cimento escolhido para as dosagens a serem calculadas é o CP III 40, devido à disponibilidade deste material em São Paulo e as resistências características à compressão do concreto são 30 e 35 MPa.

Posteriormente deve-se calcular a resistência à compressão do concreto requerida aos 28 dias ($f_{c_{28}}$), através da Equação 6.

$$f_{c_{28}} = f_{ck} + 1,65 \times S_d \quad (6)$$

onde:

$f_{c_{28}}$ - resistência à compressão do concreto requerida aos 28 dias (MPa);

f_{ck} - resistência característica do concreto à compressão (MPa);

S_d - desvio padrão das condições de preparo do concreto.

Com base nestas informações é possível obter as relações água/cimento através do Gráfico 5.

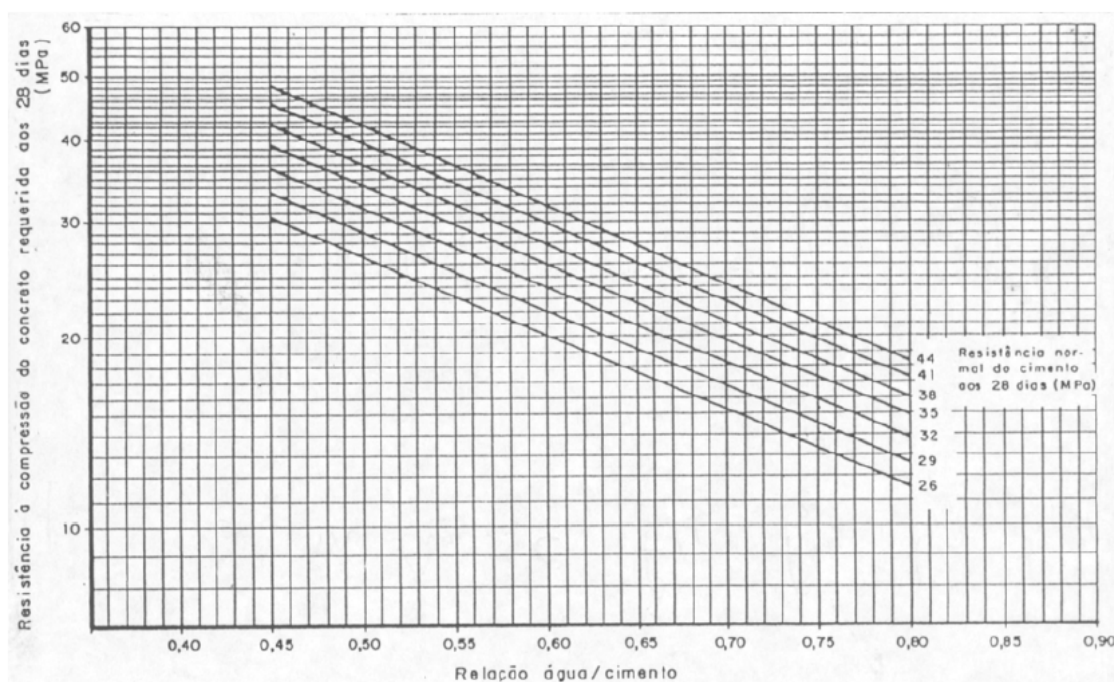


Gráfico 5. Determinação da relação água/cimento em função das resistências do concreto e cimento aos 28 dias.

Fonte: Boggio (2000, p. 53).

Os resultados obtidos pelo Gráfico 5 são apresentados no Quadro 4.

Tipo de Cimento	Traço	f_{ck} (MPa)	f_{c28} (MPa)	Relação a/c
CP III 40	01	30	36,6	0,53
	02	35	41,6	0,485

Quadro 4 Relações água/cimento dos concretos dosados pelo método ABCP

3.1.2. Determinação aproximada do consumo de água do concreto

Segundo Rodrigues (2005), a quantidade de água necessária para fornecer ao concreto fresco uma determinada consistência depende das

características e proporções dos materiais utilizados, principalmente dos agregados.

A escolha do abatimento do concreto é feita com base nos tipos de obra. O Quadro 5 apresenta abatimentos máximos e mínimos do concreto requeridos pelo método de dosagem ABCP.

Tipos de Obras	Abatimento (mm)	
	Máximo	Mínimo
Paredes de fundação e sapatas armadas	75	25
Sapatas planas, caixões e paredes de infra-estrutura	75	25
Vigas e paredes armadas	100	25
Pilares de edifícios	100	25
Pavimentos e lajes	75	25
Construções de concreto massa	50	25

Quadro 5 Abatimentos requeridos pelo método ABCP

Fonte: Boggio (2000, p. 50).

Para as simulações dos blocos de fundação, o abatimento do concreto considerado foi de 50 mm, conforme requerido para construções de concreto massa.

As britas escolhidas para as dosagens são brita 0 e brita 1, portanto, a dimensão máxima escolhida, conforme classificação da NBR 7211, é igual a 25 mm. O Quadro 6 apresenta o consumo de água (Ca) aproximado do traço.

Consumo de água aproximado (l/m ³)					
Abatimento (mm)	D _{máx} agregado graúdo (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
40 a 60	220	195	190	185	180
60 a 80	225	200	195	190	185
80 a 100	230	205	200	195	190

Quadro 6 Consumo de água aproximado (l/m³).

Fonte: Rodrigues (2005, p. 21).

Para concreto com abatimento igual a 50 mm e dimensão máxima do agregado igual a 25mm, o consumo de água aproximado é de 190 l/m³.

3.1.3. Determinação do consumo de cimento

De acordo com Rodrigues (2005), os consumos de cimento iniciais para cada dosagem são calculados com base no consumo de água e na relação água cimento, conforme apresentado na Equação 7.

$$C = \frac{Ca}{a/c} \quad (7)$$

onde:

C - consumo de cimento;

Ca - consumo de água;

a/c - relação água / cimento.

Os resultados das equações são apresentados no Quadro 7.

Traço	Relação água/cimento	Consumo aproximado de cimento (kg/m³)
01	0,53	358
02	0,485	391

Quadro 7 Consumos de cimento (kg/m³).

3.1.4. Determinação do consumo de agregado graúdo

A determinação do consumo estimado de agregado graúdo é feita com base no resultado da Equação 8.

$$Cb = V_c \cdot M_u \quad (8)$$

onde:

Cb - consumo de agregado graúdo;

V_c - volume compactado seco;

M_u - massa unitária compactada.

Para obter o volume compactado seco do agregado graúdo é preciso conhecer a sua dimensão máxima e o módulo de finura do agregado. De acordo com a NBR 7211, o módulo de finura da zona ótima do agregado miúdo varia de 2,20 e 2,90, portanto, o módulo de finura considerado para os cálculos foi de

2,60. O volume compactado seco (V_c) de agregado graúdo é obtido pelo Quadro 8.

MF	Dimensão máxima (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
1,8	0,645	0,770	0,795	0,820	0,845
2,0	0,625	0,750	0,775	0,800	0,825
2,2	0,605	0,730	0,755	0,780	0,805
2,4	0,585	0,710	0,735	0,760	0,785
2,6	0,565	0,690	0,715	0,740	0,765
2,8	0,545	0,670	0,695	0,720	0,745
3,0	0,525	0,650	0,675	0,700	0,725
3,2	0,505	0,630	0,655	0,680	0,705
3,4	0,485	0,610	0,635	0,660	0,685
3,6	0,465	0,590	0,615	0,640	0,665

Quadro 8 Volume compactado seco de agregado graúdo por m³ de concreto.

Fonte: Rodrigues (2005, p. 23).

Para agregado com dimensão máxima igual a 25 mm e módulo de finura igual a 2,6, o volume compactado seco de agregado graúdo por m³ de concreto é igual a 0,715 m³.

De acordo com Rodrigues (2005), quando não for possível determinar o valor da massa unitária adota-se o valor de 1500 kg/m³. Desta forma, o consumo de agregado graúdo é da ordem de 1072 kg/m³.

3.1.5. Determinação do consumo de agregado miúdo

Segundo Rodrigues (2005), o volume de agregado miúdo é obtido através da Equação 9.

$$V_m = 1 - \left(\frac{C}{\rho_c} + \frac{Cb}{\rho_b} + \frac{Ca}{\rho_a} \right) \quad (9)$$

onde:

V_m - volume do agregado miúdo;

C - consumo de cimento;

Cb - consumo de agregado graúdo;

Ca - consumo de água;

ρ_c - massa específica do cimento;

ρ_b - massa específica do agregado graúdo;

ρ_a = massa específica da água.

De acordo com Freitas Jr. (2012), a massa específica do cimento varia de 3000 a 3150 kg/m³, portanto, adotou-se 3100 kg/m³. A massa específica do agregado é igual a 2650 kg/m³, de acordo com Romano (2004).

Para obter o consumo de agregado miúdo utiliza-se a Equação 10.

$$C_m = \rho_m \cdot V_m \quad (10)$$

Onde:

C_m - consumo de agregado miúdo;

ρ_m - massa específica do agregado miúdo;

V_m - volume do agregado miúdo.

3.1.6. Apresentação do traço

O Quadro 9 apresenta os consumos dos materiais constituintes dos concretos utilizados nas simulações.

Traço	fck (MPa)	Cimento (kg/m³)	Brita 0 (kg/m³)	Brita 1 (kg/m³)	Areia (kg/m³)	Água (kg/m³)
01	30	358	322	750	768	190
02	35	391	322	750	740	190

Quadro 9 Consumos dos materiais constituintes dos concretos.

Definido o traço, torna-se necessário conhecer as propriedades dos materiais, tais como calor específico, condutividade térmica, coeficiente de dilatação térmica, entre outros.

3.2. PROPRIEDADES TÉRMICAS DO CONCRETO

As propriedades térmicas dos materiais constituintes do concreto foram estimadas com base em bibliografias e considerando as características dos materiais disponíveis na região de São Paulo. Os agregados utilizados na composição do concreto são de origem granítica.

A partir das quantidades de materiais constituintes do concreto é possível calcular a sua massa específica e algumas de suas propriedades térmicas. A massa específica é a soma das quantidades dos materiais presentes no concreto, portanto seu valor é igual a 2388 kg/m³ e 2393 kg/m³ para o traço 1 e 2, respectivamente. As relações água/cimento obtidas através dos traços 1 e 2 foram de 0,53 e 0,49, respectivamente.

3.2.1. Calor específico e condutividade térmica

Algumas propriedades térmicas do concreto, tais como o calor específico (c) e a condutividade térmica (k), foram calculadas através das Equações 11 e 12, respectivamente.

$$c = \frac{\sum m_i \cdot c_i}{\sum m_i} \quad (11)$$

$$k = \frac{\sum m_i \cdot k_i}{\sum m_i} \quad (12)$$

sendo:

c_i - o calor específico de cada constituinte do concreto (cal/g.°C);

k_i - a condutividade térmica de cada constituinte do concreto (W/m.K);

m_i - consumo de cada constituinte do concreto (kg/m³).

Os valores de calor específico e condutividade térmica dos materiais constituintes do concreto foram obtidos através de bibliografia e estão apresentados no Quadro 10.

Materiais	Calor Específico (cal/g.°C)	Condutividade Térmica (W/m.K)
Cimento CPIII 40	0,159	1,27
Areia	0,176	2,89
Brita 0	0,176	2,89
Brita 1	0,176	2,89
Água	1,00	0,63

Quadro 10. Calor específico e condutividade térmica dos materiais.

Fonte: Adaptado de Furnas (1997)

A partir dos valores constantes do Quadro 10 é possível calcular o calor específico e a condutividade térmica do concreto. A partir da média ponderada foram obtidos os valores de calor específico e condutividade térmica do concreto, que resultaram em 1 kJ/kg.°C e 10,3 W/m.K, respectivamente para o traço 1 e 1 kJ/kg.°C e 10,2 W/m.K, respectivamente para o traço 2.

3.2.2. Calor de hidratação

Os valores do calor de hidratação do cimento Portland de Alto Forno foram obtidos através da média de alguns resultados de ensaios realizados em 2012. Os valores obtidos através dos ensaios são apresentados no Quadro 11.

Resultados (J/g)				
24h	41h	72h	120h	168h
195	241	257	267	273

Quadro 11. Calor de hidratação do cimento CPIII 40 RS.

Fonte: Acervo pessoal

A partir dos valores obtidos foi preciso ajustar uma curva de modo que os valores intermediários pudessem ser determinados. O Gráfico 6 apresenta a evolução do calor de hidratação do cimento CPIII 40 RS.

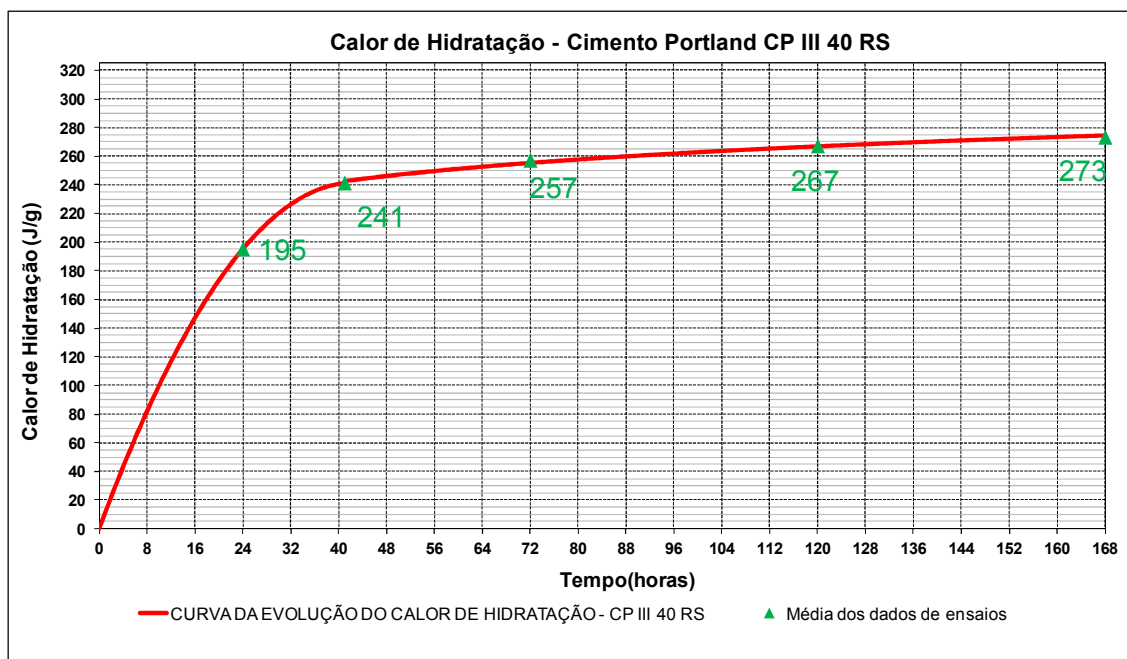


Gráfico 6. Evolução do calor de hidratação do cimento CPIII 40 RS.

Fonte: Acervo pessoal

3.2.3. Elevação adiabática de temperatura

A partir da evolução do calor de hidratação, do consumo do cimento, da massa específica e do calor específico do concreto foram calculados os valores de elevação adiabática do concreto a partir da fórmula de Rastrup apresentada na Equação 1. A evolução da elevação adiabática dos concretos é apresentada no Gráfico 7.

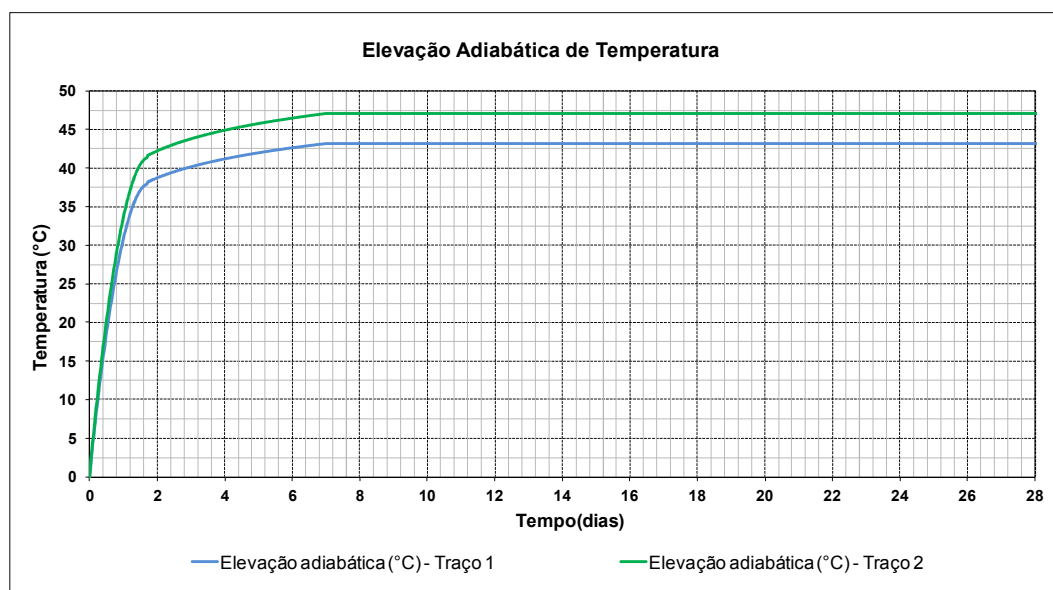


Gráfico 7. Evolução da elevação adiabática do concreto.

Fonte: Acervo pessoal

3.2.4. Coeficiente de dilatação térmica

Outra propriedade essencial para o cálculo térmico é o coeficiente de dilatação térmica do concreto (α), que foi determinado através da Equação 13.

$$\alpha = \frac{m_{pasta} \cdot \alpha_{pasta} + m_{areia} \cdot \alpha_{areia} + m_{brita} \cdot \alpha_{brita}}{m_{pasta} + m_{areia} + m_{brita}} \quad (13)$$

sendo:

m_i - consumo de cada constituinte do concreto (kg/m³);

α_i - coeficiente de dilatação térmica de cada constituinte do concreto (10⁻⁶/°C).

O valor do coeficiente de dilatação térmica da pasta foi obtido no livro de Furnas (1997) através da relação água cimento. Através dos cálculos, os coeficientes de dilatação térmica dos concretos resultaram em 11,1x10⁻⁶/°C e 11,2x10⁻⁶/°C, para o traço 1 e 2, respectivamente.

3.2.5. Temperatura de lançamento do concreto fresco

De acordo com Silva e Battagin (2012), as proporções em massa de cada material constituinte do concreto, seus respectivos valores de calor específico e temperatura influenciam na temperatura do concreto. O Quadro 12 e o Quadro 13 apresentam os balanços térmicos realizados para a determinação da temperatura de lançamento do concreto fresco com fck igual a 30 e 35 MPa, respectivamente.

Tabela 1- BALANÇO TÉRMICO - (30MPa/28d)							GELO	0%	
Materiais	Consumo	Calor esp.	q = mc	E	Ti	Tf	Ti - Tf	Quant. Calor	(kcal/m³)
Mistura	(kg/m³)	(kcal/kg.°C)	(kcal/m³.°C)	(kcal/m³)	(°C)	(°C)	(°C)	Positivo	Negativo
Cimento	358	0,159	56,92	56,92	50,0		50,0	2846,10	
Areia (granítica)	768	0,176	135,17	135,17	23,0		22,0	2973,70	
Brita 0 (granítica)	322	0,176	56,67	56,67	23,0		22,0	1246,78	
Brita 1 (granítica)	750	0,176	132,00	132,00	25,0		23,0	3036,00	
Água	141	1,000	140,88	140,88	22,0		20,0	2817,60	
Umidade miúdo areia granítica (5%)	38,4	1,000	38,40	38,40	23,0		22,0	844,80	
Umidade do grão(1%)	10,7	1,000	10,72	10,72	25,0		23,0	246,56	
Mistura Betoneira	-	-	-	-	-	-	-	2000,00	

Equivalente em água (E=mc) = **570,8** kcal/m³

Quantidade total de calor (Q) = **16011,5** kcal/m³.°C

Calor específico (c) = 0,24 kcal/kg.°C

Condutividade Térmica (k)= 2,46 kcal/m.h°C

Temperatura de saída do concreto da betoneira (Q / E) =

Ganho de temperatura no transporte até o local de lançamento =

Temperatura de lançamento do concreto =

Tc =	28,1 °C
Tt =	2,0 °C
TL =	30,1 °C

Quadro 12. Balanço térmico do concreto com fck igual a 30 MPa.

Fonte: Acervo pessoal

Tabela 1- BALANÇO TÉRMICO - (35MPa/28d)							GELO	0%	
Materiais	Consumo	Calor esp.	q = mc	E	Ti	Tf	Ti - Tf	Quant. Calor	(kcal/m³)
Mistura	(kg/m³)	(kcal/kg.°C)	(kcal/m³.°C)	(kcal/m³)	(°C)	(°C)	(°C)	Positivo	Negativo
Cimento	391	0,159	62,17	62,17	50,0		50,0	3108,45	
Areia (granítica)	740	0,176	130,24	130,24	23,0		22,0	2865,28	
Brita 0 (granítica)	322	0,176	56,67	56,67	23,0		22,0	1246,78	
Brita 1 (granítica)	750	0,176	132,00	132,00	25,0		23,0	3036,00	
Água	142	1,000	142,28	142,28	22,0		20,0	2845,60	
Umidade miúdo areia granítica (5%)	37,0	1,000	37,00	37,00	23,0		22,0	814,00	
Umidade do grão(1%)	10,7	1,000	10,72	10,72	25,0		23,0	246,56	
Mistura Betoneira	-	-	-	-	-	-	-	2000,00	

Equivalente em água (E=mc) = **571,1** kcal/m³

Quantidade total de calor (Q) = **16162,7** kcal/m³.°C

Calor específico (c) = 0,24 kcal/kg.°C

Condutividade Térmica (k)= 2,44 kcal/m.h°C

Temperatura de saída do concreto da betoneira (Q / E) =

Ganho de temperatura no transporte até o local de lançamento =

Temperatura de lançamento do concreto =

Tc =	28,3 °C
Tt =	2,0 °C
TL =	30,3 °C

Quadro 13. Balanço térmico do concreto com fck igual a 35 MPa.

Fonte: Acervo pessoal

A temperatura de lançamento adotada para os concretos utilizados nas simulações computacionais foi considerada igual a 30°C, conforme resultados dos balanços térmicos.

3.3. PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO

3.3.1. Coeficiente de Poisson

O coeficiente de Poisson foi estimado a partir da dosagem do concreto, admitindo-se o uso de cimento CPIII 40 e agregados miúdos e graúdos de origem granítica. O valor do coeficiente de Poisson adotado para os cálculos foi de 0,21.

3.3.2. Resistência à compressão

A partir das resistências características à compressão do concreto adotadas foi feita uma curva aproximada das resistências à compressão requeridas. Os resultados são apresentados no Gráfico 8.

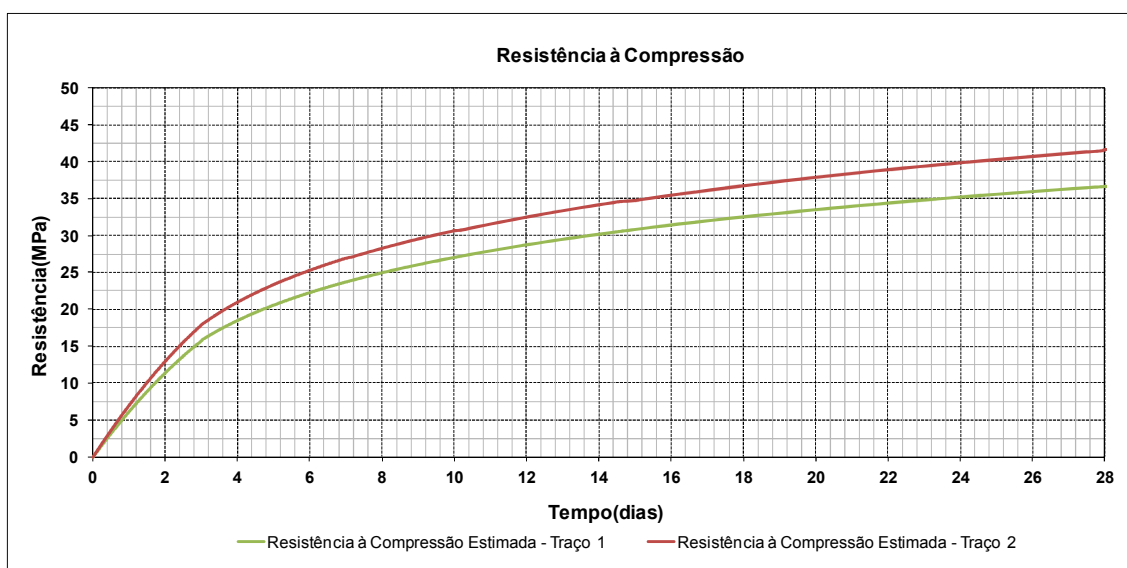


Gráfico 8. Evolução da resistência à compressão do concreto
Fonte: Acervo pessoal

3.3.3. Resistência à tração

Os valores de resistência à tração do concreto foram considerados iguais a 10% dos valores de resistência à compressão. O Gráfico 9 apresenta os valores considerados nos cálculos térmicos.

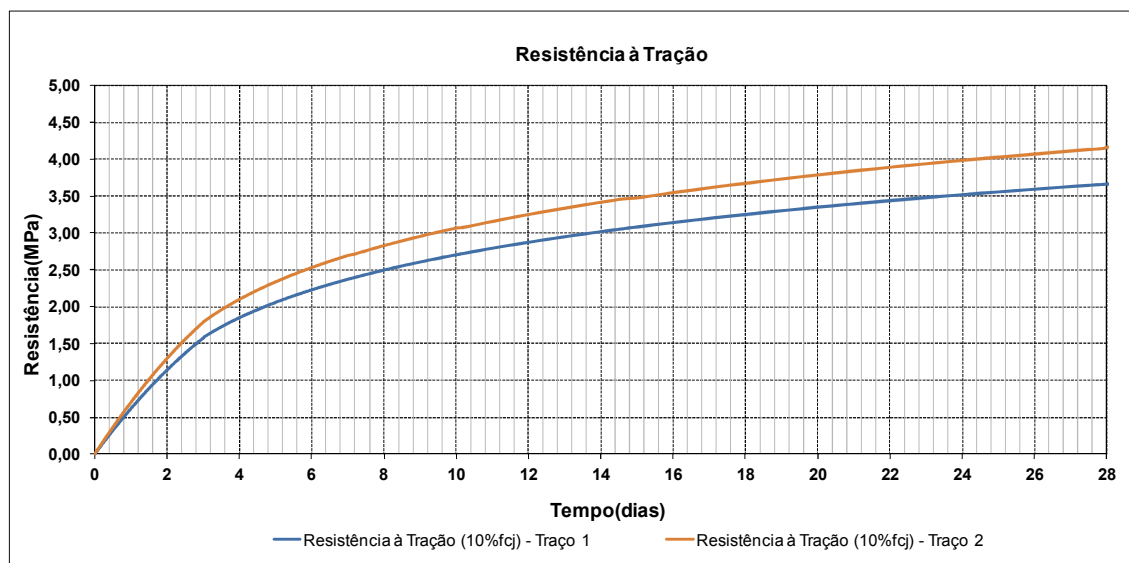


Gráfico 9. Evolução da resistência à tração do concreto.

Fonte: Acervo pessoal

3.3.4. Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade do concreto foi calculado através da fórmula da NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007) que leva em conta os resultados de resistência à compressão. O Gráfico 10 apresenta a evolução do módulo de elasticidade utilizado no estudo térmico.

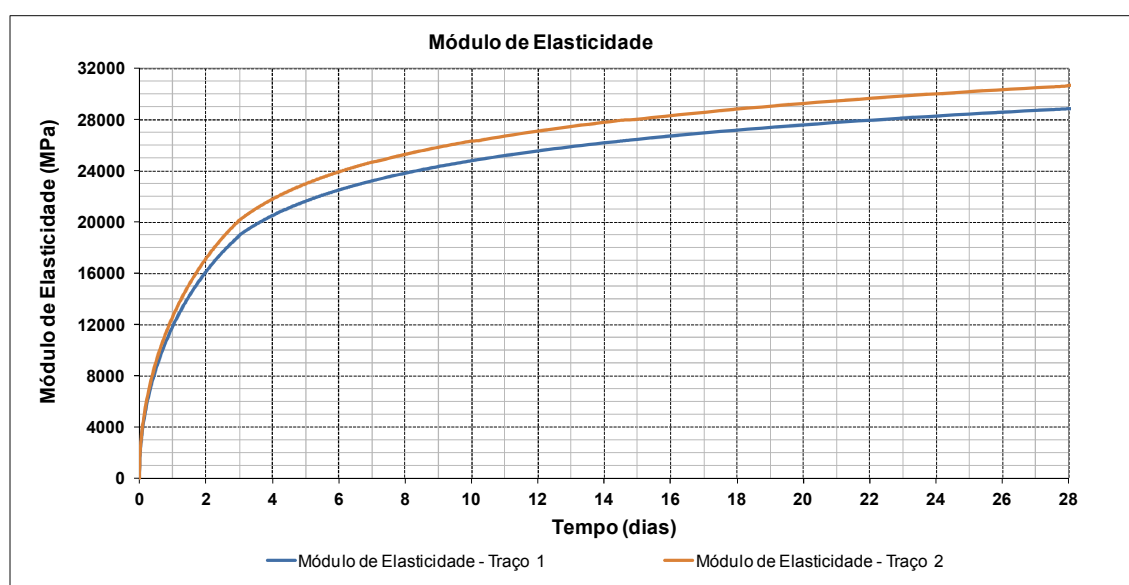


Gráfico 10. Evolução do módulo de elasticidade do concreto.

Fonte: Acervo pessoal

3.4. CONDIÇÕES DE CONTORNO

As condições de contorno abrangem a temperatura ambiente, a velocidade do vento, as fôrmas, entre outros.

O valor da temperatura média ambiente de São Paulo em 2012 considerado no cálculo é igual a 20°C, com base nos estudos realizados pela Prefeitura de São Paulo em 2012.

A velocidade do vento foi adotada como 10 km/h, baseado nas informações disponível no site do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC).

As fôrmas foram colocadas no início da concretagem e retiradas 3 dias após o término da mesma.

O presente capítulo tratou sobre as variáveis envolvidas nas simulações. Já o capítulo seguinte apresentará os resultados obtidos e fará uma análise dos mesmos.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

O capítulo anterior expôs as informações necessárias para a realização dos estudos térmicos.

Esse capítulo apresenta e analisa os resultados para a determinar as condições necessárias para a ocorrência de fissuras de origem térmica nos blocos de fundação simulados computacionalmente através do software b4cast.

4.1. LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE ESTUDO

Para analisar os resultados obtidos através do software e comparar os blocos simulados foi necessário estabelecer um padrão de análise, ou seja, foram escolhidos pontos de estudo. Os pontos de estudo foram localizados no centro dos blocos variando de 10% a 90% a altura acima da base, como mostra a Figura 3.

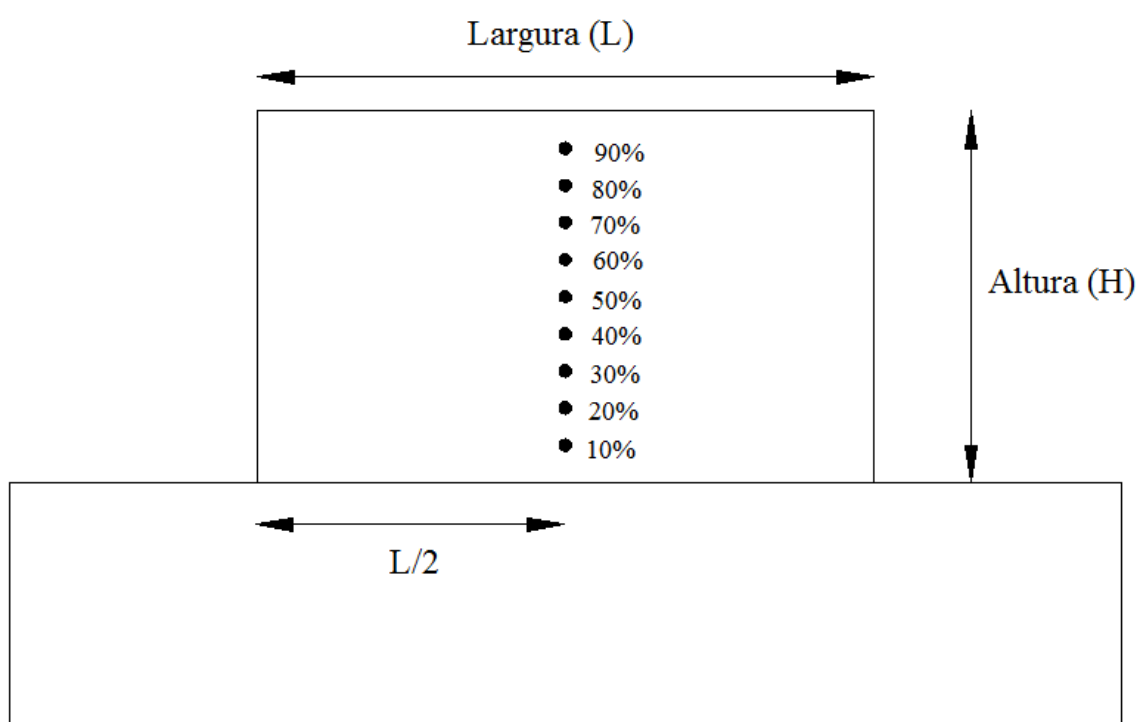


Figura 3. Localização dos pontos de estudo

Os pontos de estudo dos blocos simulados com bases quadradas de 1 m x 1 m são apresentados nas Figuras 4 a 6.

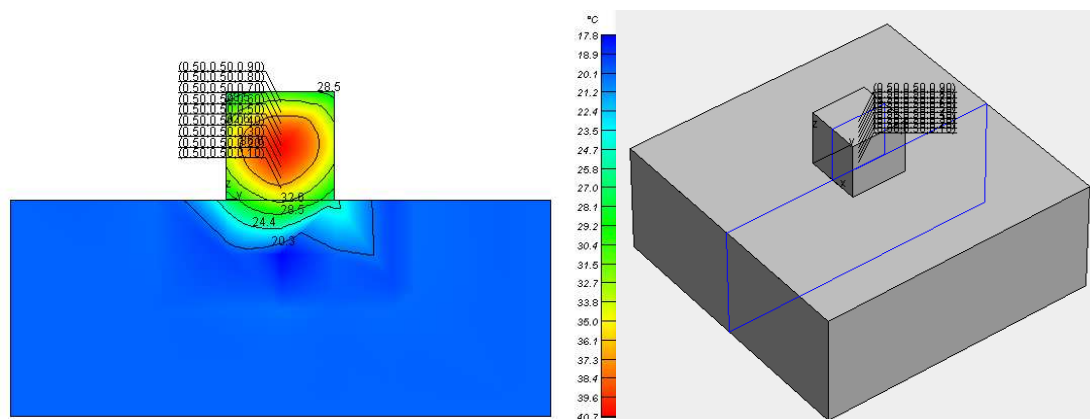


Figura 4. Localização dos pontos no bloco 01 (1mx1mx1m).

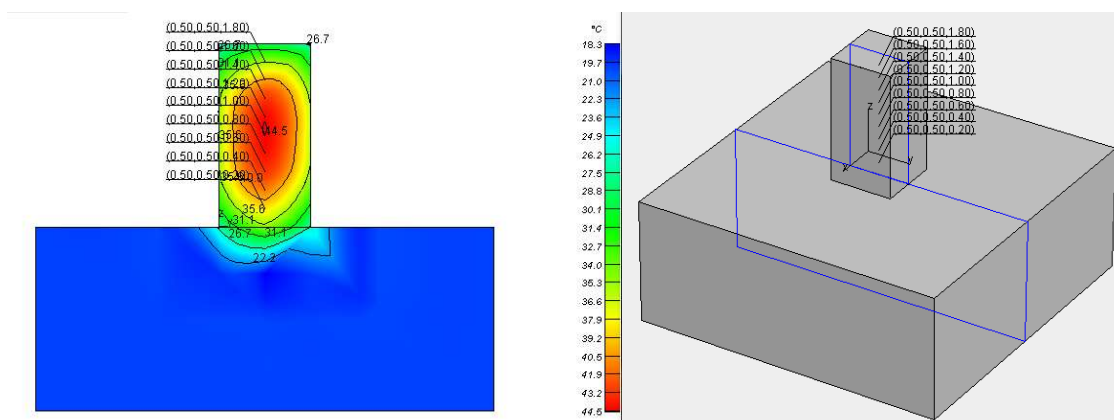


Figura 5. Localização dos pontos no bloco 02 (1mx1mx2m).

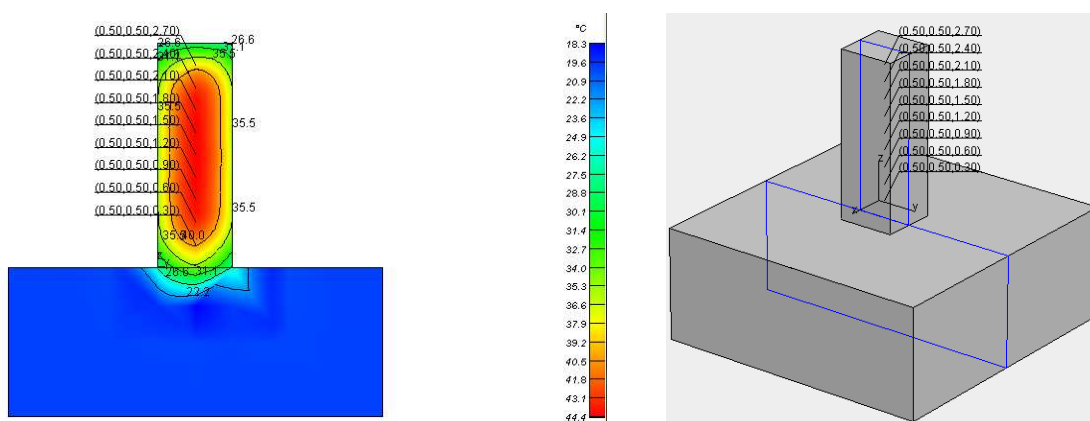


Figura 6. Localização dos pontos no bloco 03 (1mx1mx3m).

Os pontos de estudo dos blocos simulados com bases quadradas de 3 m x 3 m são apresentados nas Figuras 7 a 9.

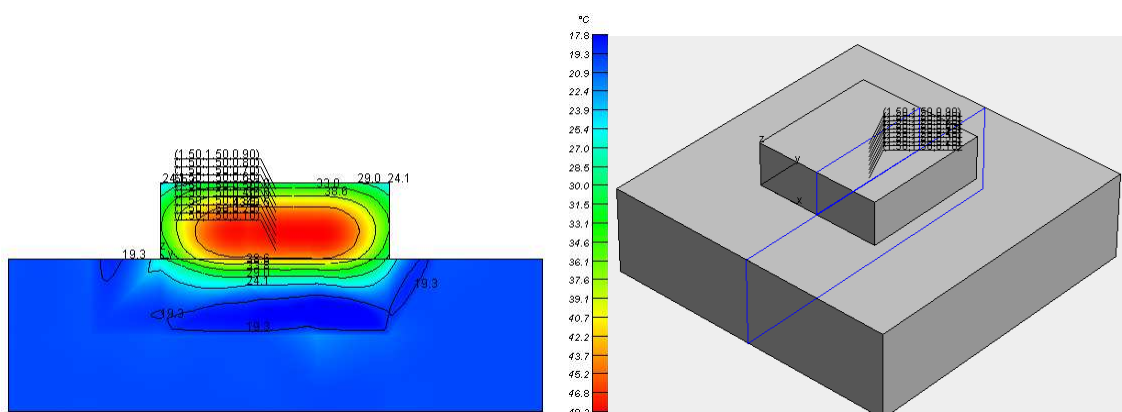


Figura 7. Localização dos pontos no bloco 04 (3mx3mx1m).

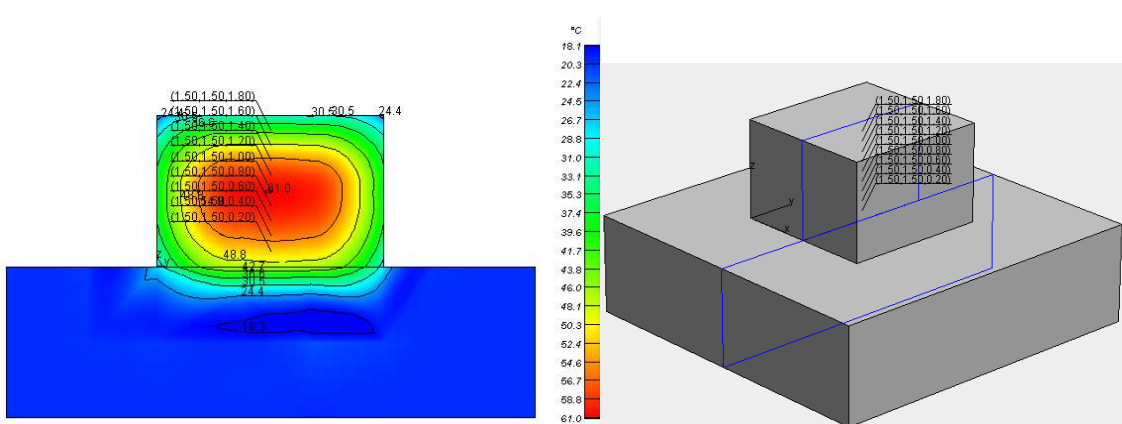


Figura 8. Localização dos pontos no bloco 05 (3mx3mx2m).

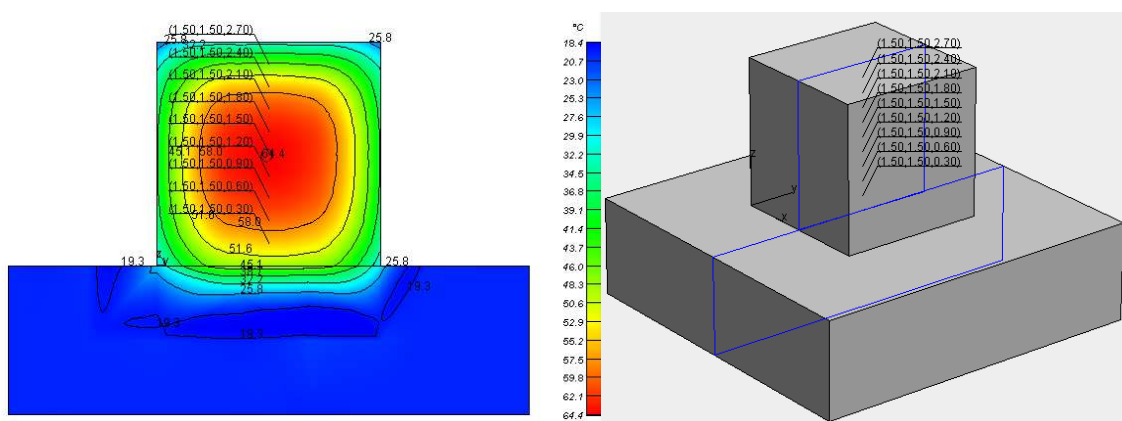


Figura 9. Localização dos pontos no bloco 06 (3mx3mx3m).

Os pontos de estudo dos blocos simulados com bases quadradas de 5 m x 5 m são apresentados nas Figuras 10 a 12.

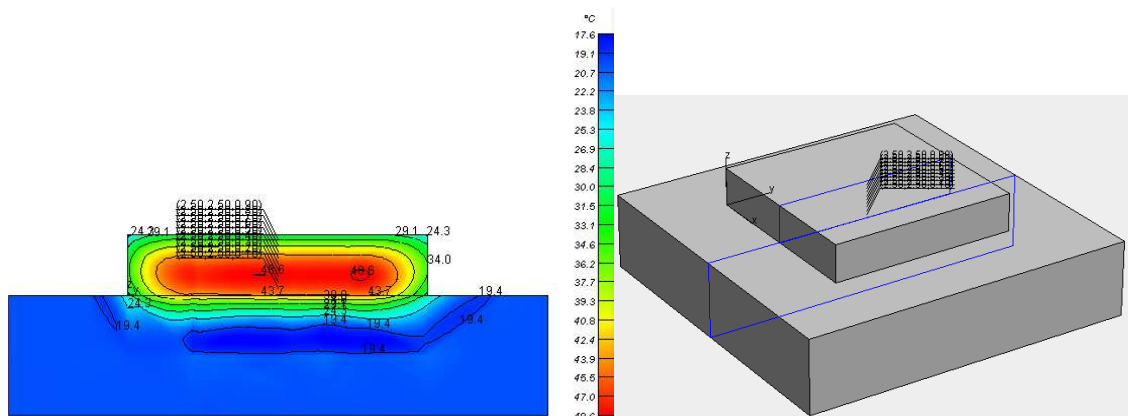


Figura 10. Localização dos pontos no bloco 07 (5mx5mx1m).

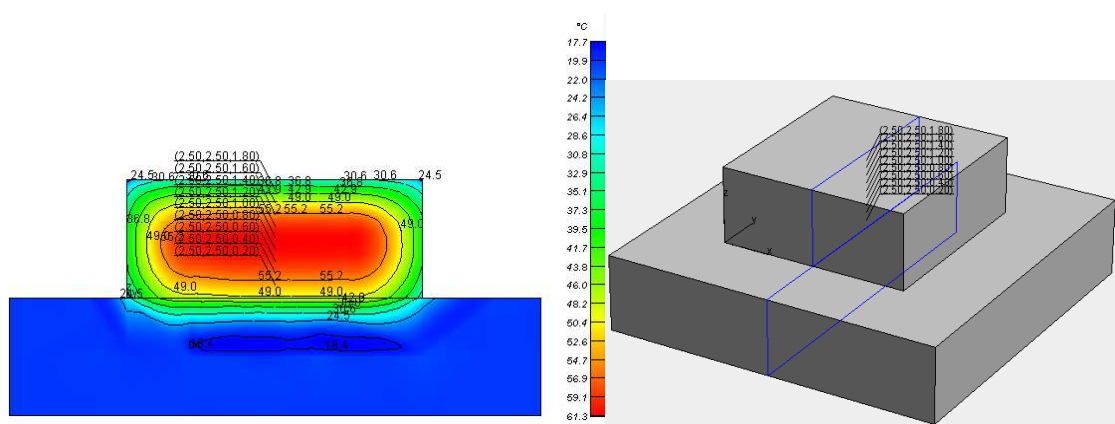


Figura 11. Localização dos pontos no bloco 08 (5mx5mx2m).

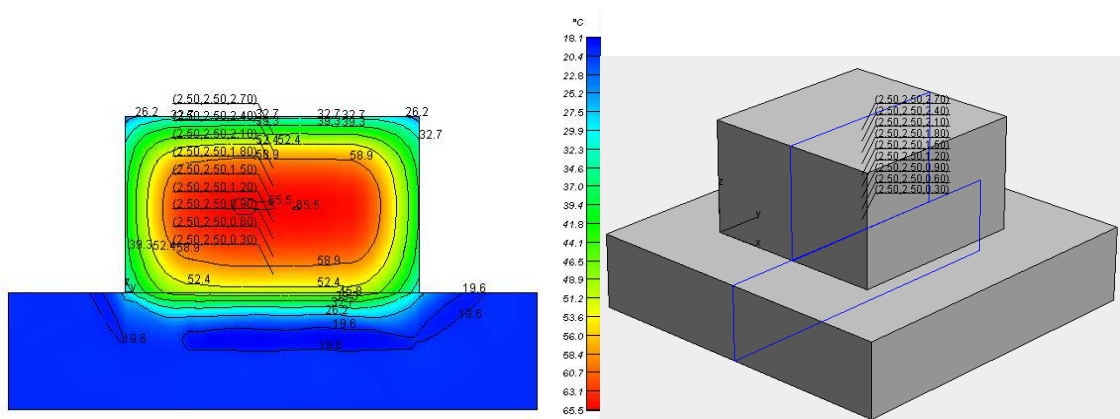


Figura 12. Localização dos pontos no bloco 09 (5mx5mx3m).

Os pontos de estudo dos blocos simulados com bases quadradas de 8 m x 8 m são apresentados nas Figuras 13 a 15.

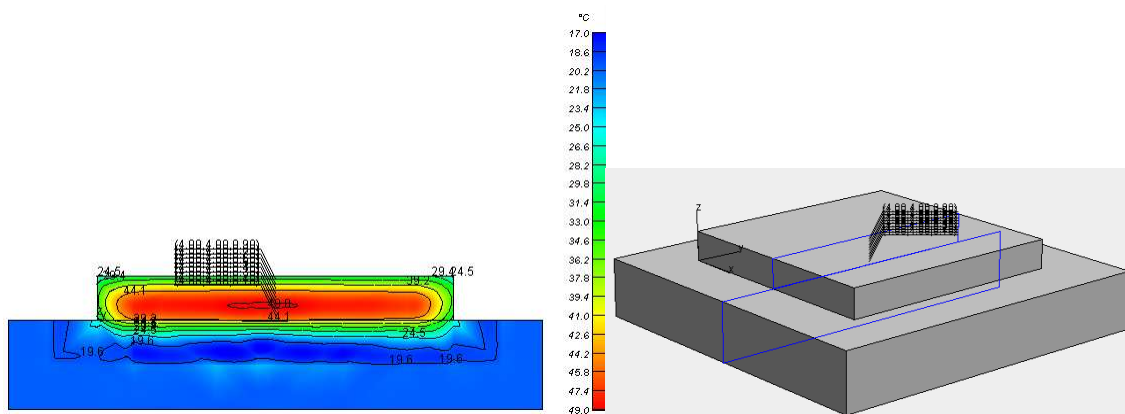


Figura 13. Localização dos pontos no bloco 10 (8mx8mx1m).

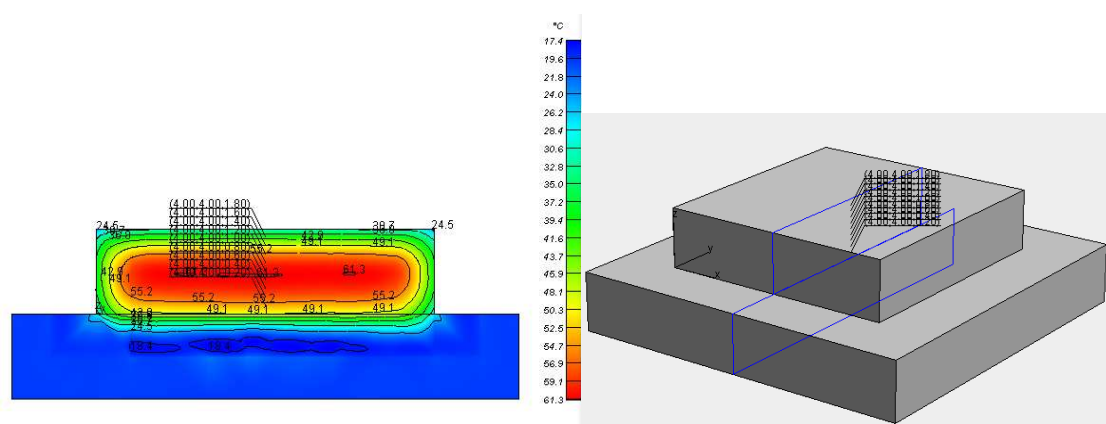


Figura 14. Localização dos pontos no bloco 11 (8mx8mx2m).

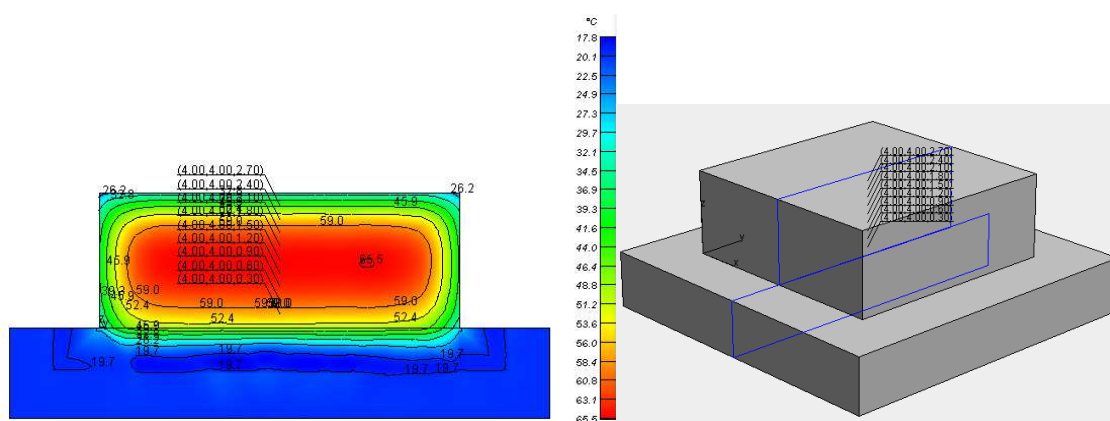


Figura 15. Localização dos pontos no bloco 12 (8mx8mx3m).

Os blocos 13 a 24 possuem pontos de estudo localizados nos mesmos locais que os blocos 1 a 12, respectivamente.

Os pontos de estudo dos blocos apresentaram como resultados a evolução das temperaturas e tensões de tração desde de o instante de lançamento do concreto até a estabilização da temperatura do concreto com a temperatura ambiente, ou seja, até o instante em que as tensões de tração são reduzidas.

Para a análise dos blocos em estudo foram considerados apenas os valores máximos de temperaturas e tensões de tração, assim é possível avaliar o eventual aparecimento de fissuras de origem térmica com base comparação entre as tensões máximas de tração geradas e a resistência do concreto à tração.

4.2. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DOS BLOCOS DE CONCRETO COM RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA DE 30 MPa

As temperaturas máximas nos pontos de estudo dos blocos de concreto com resistência característica de 30 MPa, alturas iguais a 1, 2 e 3 metros e larguras da base (L) variáveis são apresentadas no Gráfico 11, Gráfico 12 e no Gráfico 13, respectivamente.

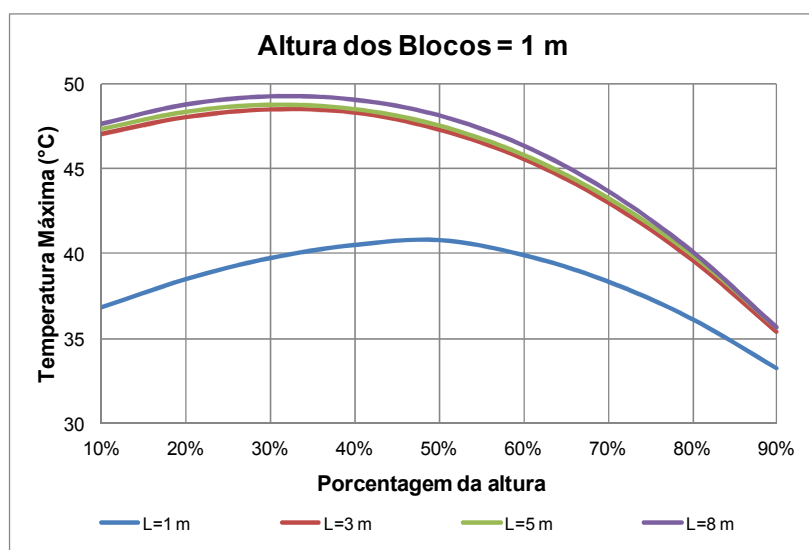


Gráfico 11. Temperaturas máximas nos pontos de estudo dos blocos com alturas iguais a 1 metro (Concreto com f_{ck} igual a 30 MPa aos 28 dias).

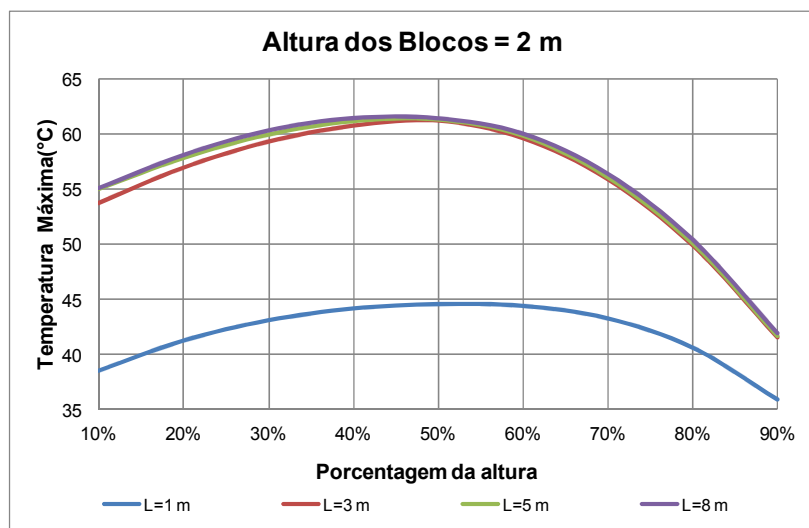


Gráfico 12. Temperaturas máximas nos pontos de estudo dos blocos com alturas iguais a 2 metros (Concreto com fck igual a 30 MPa aos 28 dias).

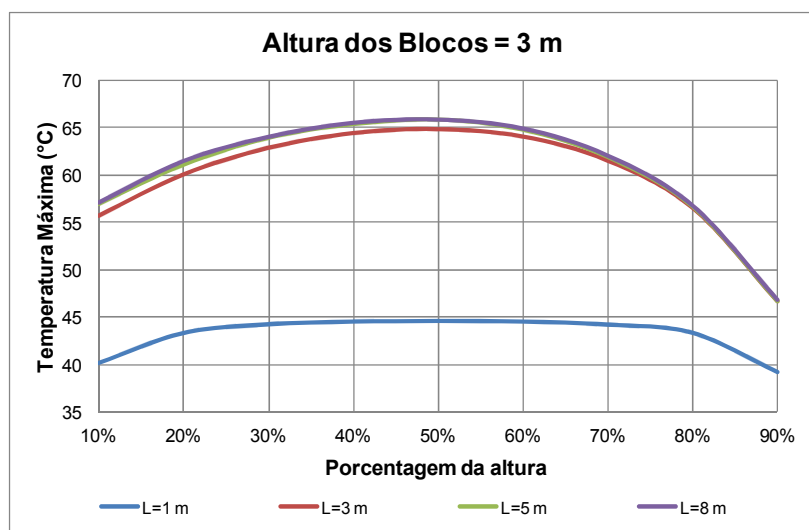


Gráfico 13. Temperaturas máximas nos pontos de estudo dos blocos com alturas iguais a 3 metros (Concreto com fck igual a 30 MPa aos 28 dias).

Através da análise do Gráfico 11, Gráfico 12 e do Gráfico 13 é possível verificar que as maiores temperaturas se encontram entre 30% e 50% da altura dos blocos simulados, ou seja, onde a dissipação de calor é prejudicada. Nos pontos localizados abaixo de 30% da altura é notável que as temperaturas máximas são menores devido à troca de calor entre o concreto e o solo e acima de 50 % da altura ocorre a dissipação de calor para o meio externo e quanto mais próximo da superfície superior dos blocos, menor é a temperatura máxima.

Além disso, verificou-se que as temperaturas máximas dos blocos com larguras da base iguais a 1 metro são consideravelmente inferiores às temperaturas máximas dos blocos com larguras da base iguais a 3, 5 e 8 metros e

que as temperaturas máximas obtidas nestes últimos blocos são próximas. Estas observações podem ser verificadas no Gráfico 14, Gráfico 15 e no Gráfico 16.

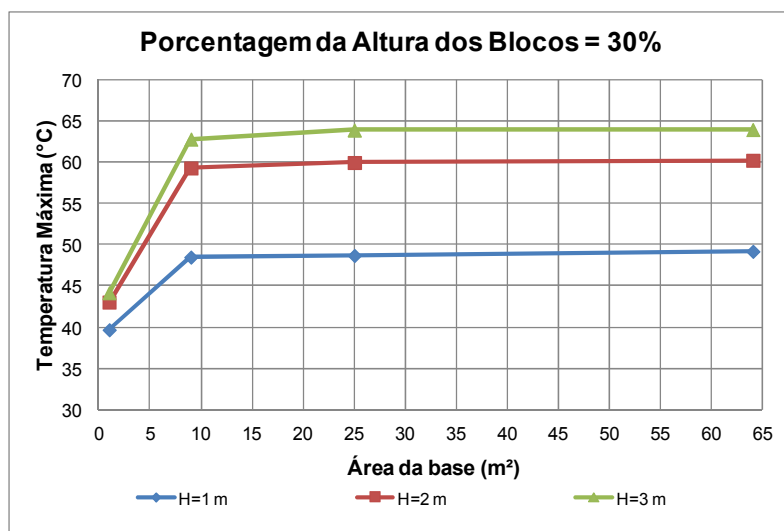


Gráfico 14. Temperaturas máximas no ponto de estudo localizado a 30% da altura (Concreto com f_{ck} igual a 30 MPa aos 28 dias).

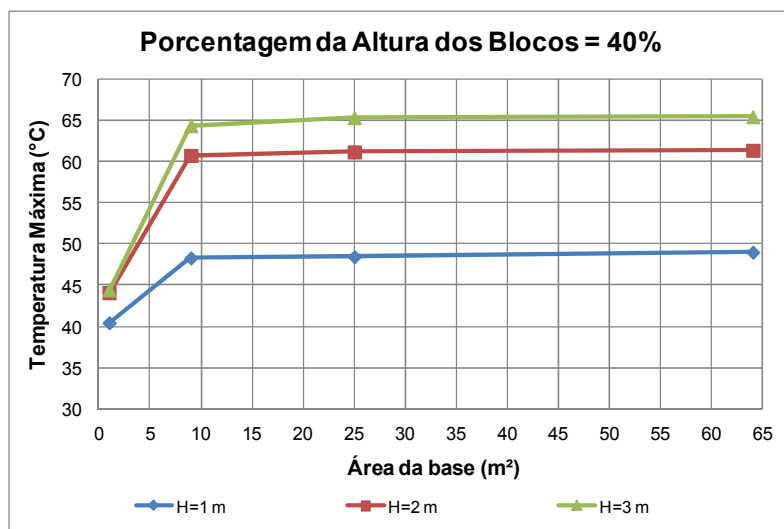


Gráfico 15. Temperaturas máximas no ponto de estudo localizado a 40% da altura (Concreto com f_{ck} igual a 30 MPa aos 28 dias).

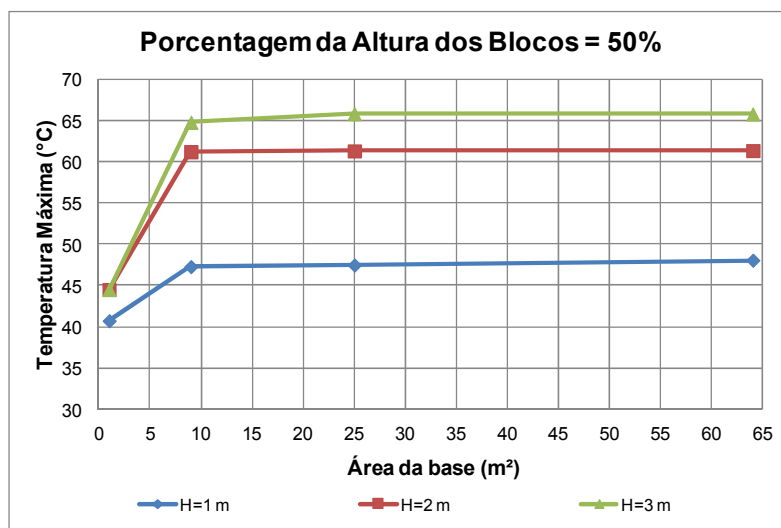


Gráfico 16. Temperaturas máximas no ponto de estudo localizado a 50% da altura (Concreto com f_{ck} igual a 30 MPa aos 28 dias).

O Gráfico 14, Gráfico 15 e Gráfico 16 apresentam as temperaturas máximas nos pontos localizados a 30%, 40% e 50% da altura dos blocos, respectivamente, onde verificaram-se as maiores temperaturas. Os demais pontos de estudo apresentam resultados com comportamentos similares. Observou-se que os blocos com áreas da base superiores a 9 m² (3mx3m) apresentaram temperaturas máximas praticamente constantes.

Para verificar a possibilidade de fissuração do concreto foram determinadas as tensões máximas de tração nos pontos de estudo e definida a resistência à tração do concreto. Nas simulações computacionais não foram considerados os efeitos da fluência, portanto, com base nas experiências pregressas adotou-se um fator de segurança igual a 1,2, ou seja, a resistência à tração do concreto foi reduzida em 20%, passando de 3,7 MPa para 3,0 MPa aos 28 dias.

Nos pontos em que as tensões de tração máximas superarem a resistência do concreto à tração ocorrem as fissuras.

As tensões de tração máximas nos pontos de estudo dos blocos de fundação com alturas iguais a 1, 2 e 3 metros e larguras da base (L) variáveis são apresentadas no Gráfico 17, Gráfico 18 e no Gráfico 19, respectivamente.

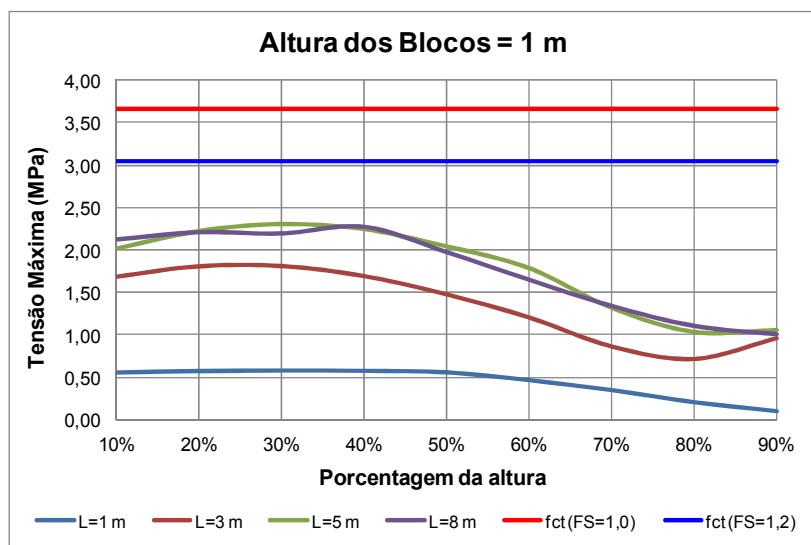


Gráfico 17. Tensões de tração máximas nos pontos de estudo dos blocos com alturas iguais a 1 metro (Concreto com f_{ck} igual a 30 MPa aos 28 dias).

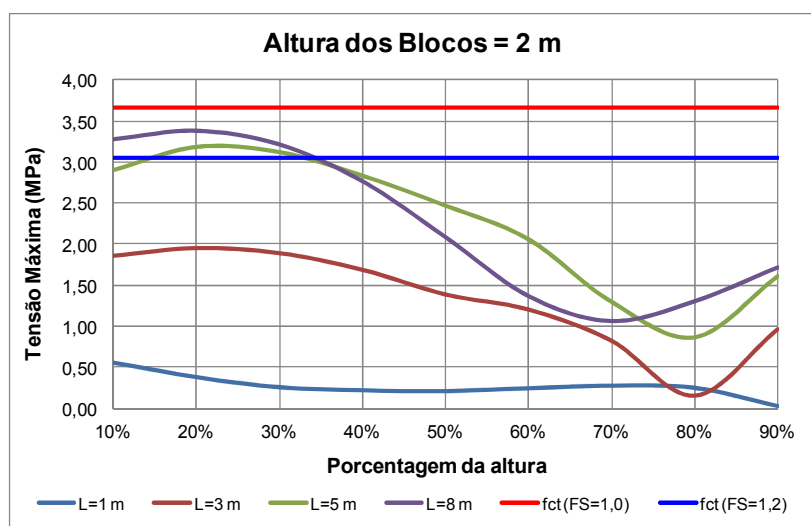


Gráfico 18. Tensões de tração máximas nos pontos de estudo dos blocos com alturas iguais a 2 metros (Concreto com f_{ck} igual a 30 MPa aos 28 dias).

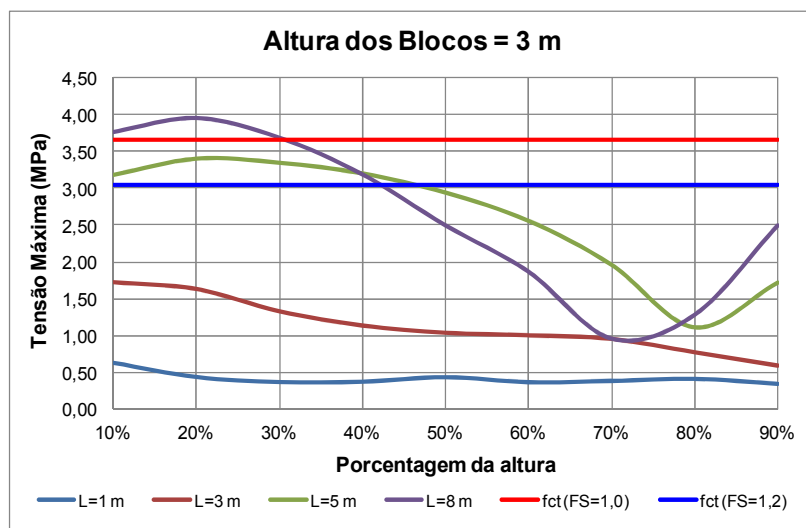


Gráfico 19. Tensões de tração máximas nos pontos de estudo dos blocos com alturas iguais a 3 metros (Concreto com f_{ck} igual a 30 MPa aos 28 dias).

No Gráfico 17, Gráfico 18 e no Gráfico 19 observa-se que alguns pontos localizados acima de 70% da altura dos blocos, ou seja, localizados próximo à superfície, apresentaram tensões de tração máximas crescentes, possivelmente devido à rápida dissipação de calor para o meio externo e que as tensões máximas de tração ocorrem nos pontos localizados entre 10% e 40% da altura e que os blocos com dimensões iguais a 5mx5mx2m, 5mx5mx3m, 8mx8mx2m e 8mx8mx3m apresentaram possibilidade de fissuração, considerando fator de segurança igual a 1,2. Portanto, os blocos de fundação com volumes de concreto iguais a 50, 75, 128 e 192 m³ possivelmente apresentarão fissuras de origem térmica.

No Gráfico 17, Gráfico 18 e no Gráfico 19 verifica-se que as tensões de tração máximas, de modo geral, nos blocos com largura da base (L) igual a 1 metro são inferiores às tensões de tração máximas dos blocos com largura da base igual a 3 metros e que estas são inferiores às tensões máximas de tração dos blocos com larguras da base iguais a 5 e 8 metros. Estas informações também podem ser verificadas no Gráfico 20.

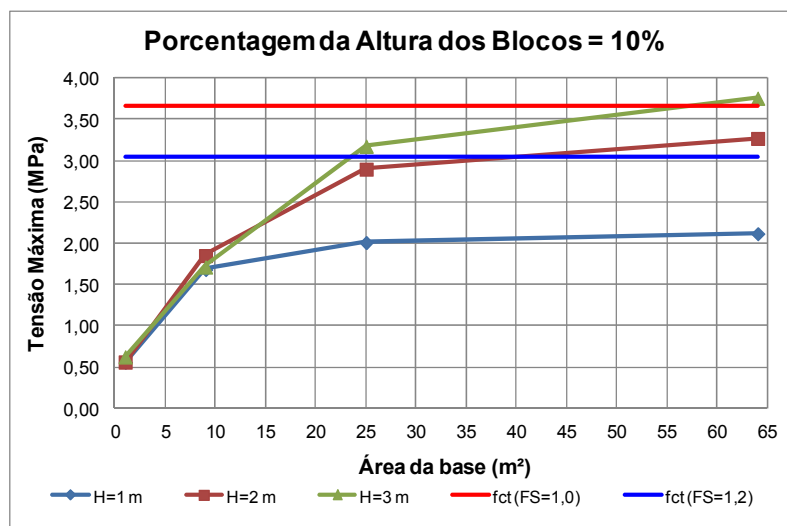


Gráfico 20. Tensões de tração máximas nos pontos de estudo localizados a 10 % da altura dos blocos (Concreto com f_{ck} igual a 30 MPa aos 28 dias).

Os blocos com larguras da base iguais a 5 e 8 metros apresentam valores de tensões máximas de tração próximos. Como as tensões de tração estão relacionadas ao grau de restrição (K_r), módulo de elasticidade do concreto, ao gradiente de temperatura, entre outros fatores, estes resultados podem ser justificados pela proximidade destes valores nestes blocos.

Conforme apresentado no Gráfico 14, Gráfico 15 e Gráfico 16, as temperaturas máximas dos blocos com alturas constantes e com larguras da base iguais a 3, 5 e 8 são próximas, portanto, os gradientes de temperatura, ou seja, a diferença entre a temperatura máxima e a temperatura de estabilização (temperatura ambiente) são praticamente os mesmos. Os valores de módulo de elasticidade do concreto na idade de estabilização dos blocos de mesma altura e com larguras da base iguais a 5 e 8 metros são idênticos, pois a estabilização da temperatura destes blocos ocorre após 28 dias de idade, portanto os valores de módulo de elasticidade são iguais a 28816 MPa, conforme apresentado no Gráfico 10. Além disso, para a mesma altura e larguras crescentes, a relação L/H aumenta e consequentemente o grau de restrição (K_r) também aumenta e quanto maior o valor de L/H , mais próximos são os valores de K_r , conforme apresentado na Figura 1.

4.3. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DOS BLOCOS DE CONCRETO COM RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA DE 35 MPa

As temperaturas máximas nos pontos de estudo dos blocos de concreto com resistência característica de 35 MPa, alturas iguais a 1, 2 e 3 metros e larguras da base (L) variáveis são apresentadas no Gráfico 21, Gráfico 22 e no Gráfico 23, respectivamente.

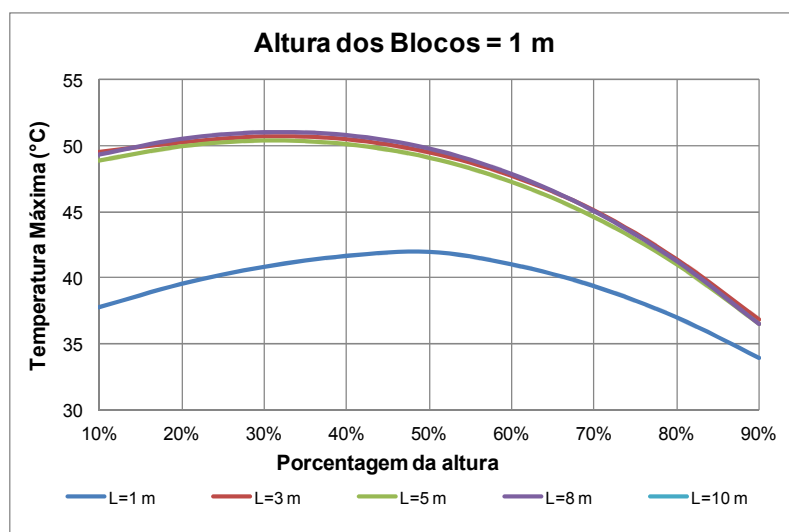


Gráfico 21. Temperaturas máximas nos pontos de estudo dos blocos com alturas iguais a 1 metro (Concreto com fck igual a 35 MPa aos 28 dias).

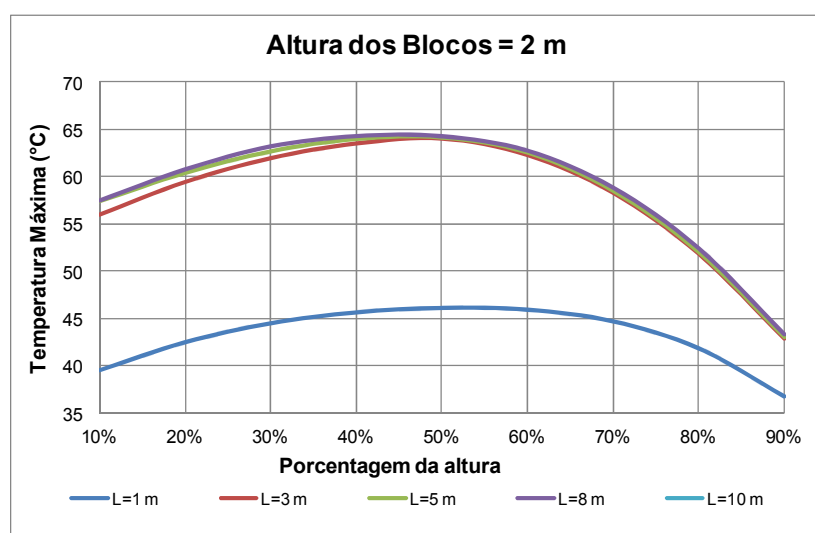


Gráfico 22. Temperaturas máximas nos pontos de estudo dos blocos com alturas iguais a 2 metros (Concreto com fck igual a 35 MPa aos 28 dias).

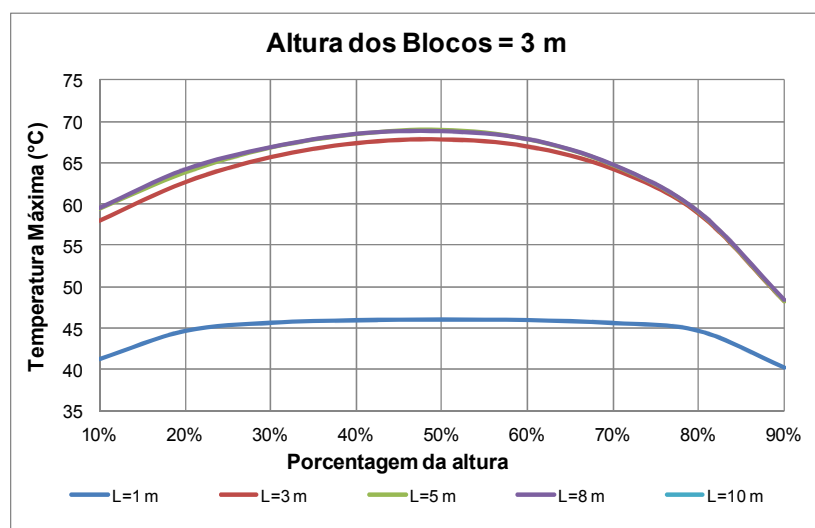


Gráfico 23. Temperaturas máximas nos pontos de estudo dos blocos com alturas iguais a 3 metros (Concreto com f_{ck} igual a 35 MPa aos 28 dias).

Através da análise do Gráfico 21, Gráfico 22 e Gráfico 23 é possível verificar que as maiores temperaturas se encontram entre 30% e 50% da altura dos blocos simulados, ou seja, onde a dissipação de calor é prejudicada. Nos pontos localizados abaixo de 30% da altura é notável que as temperaturas máximas são menores devido à troca de calor entre o concreto e o solo e acima de 50 % da altura ocorre a dissipação de calor para o meio externo e quanto mais próximo da superfície superior dos blocos, menor é a temperatura máxima.

Além disso, verificou-se que as temperaturas máximas dos blocos com larguras da base iguais a 1 metro são consideravelmente inferiores às temperaturas máximas dos blocos com larguras da base iguais a 3, 5 e 8 metros e que as temperaturas máximas obtidas nestes últimos blocos são próximas. Estas observações podem ser verificadas no Gráfico 24, Gráfico 25 e no Gráfico 26.

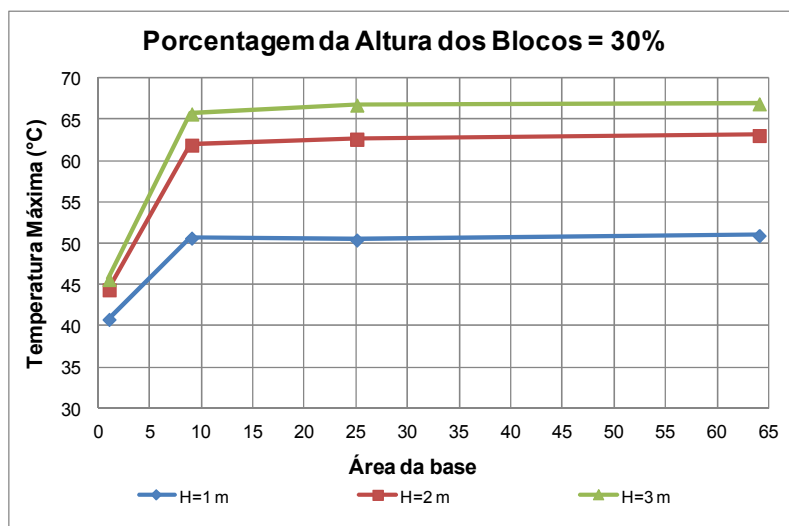


Gráfico 24. Temperaturas máximas no ponto de estudo localizado a 30% da altura (Concreto com f_{ck} igual a 35 MPa aos 28 dias).

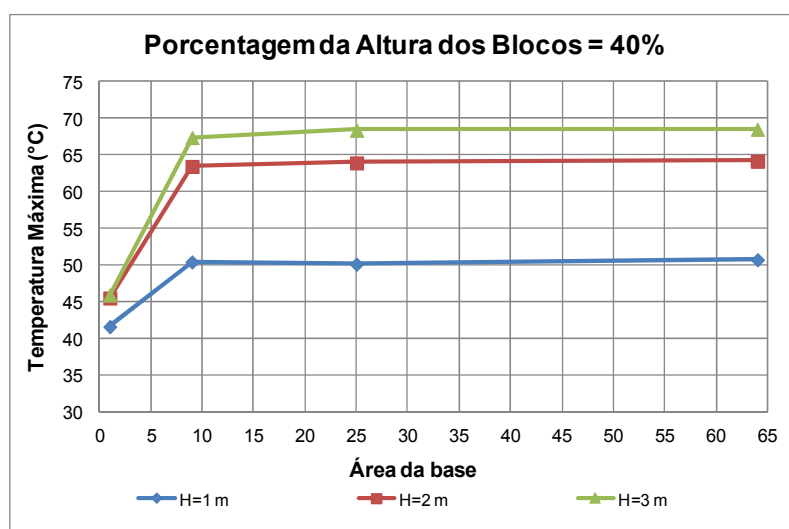


Gráfico 25. Temperaturas máximas no ponto de estudo localizado a 40% da altura (Concreto com f_{ck} igual a 35 MPa aos 28 dias).

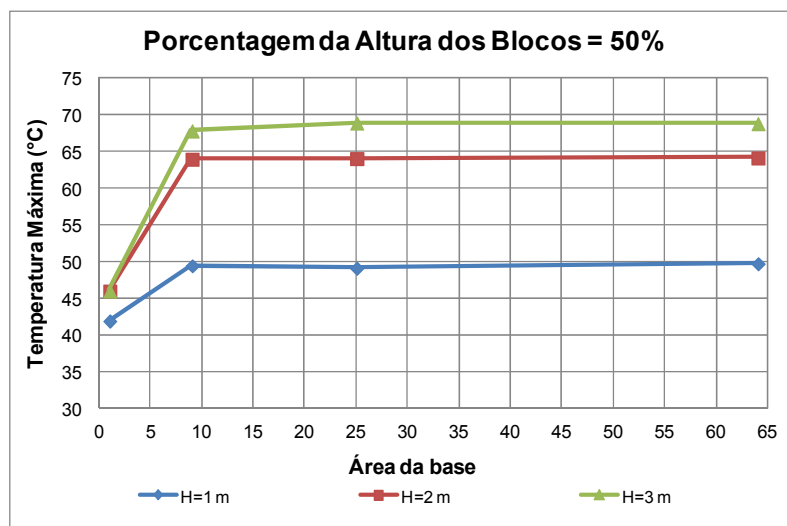


Gráfico 26. Temperaturas máximas no ponto de estudo localizado a 50% da altura (Concreto com f_{ck} igual a 35 MPa aos 28 dias).

O Gráfico 24, Gráfico 25 e Gráfico 26 apresentam as temperaturas máximas nos pontos localizados a 30%, 40% e 50% da altura dos blocos, respectivamente, onde verificaram-se as maiores temperaturas. Os demais pontos de estudo apresentam resultados com comportamentos similares. Observou-se que os blocos com áreas da base superiores a 9 m² (3mx3m) apresentaram temperaturas máximas praticamente constantes.

Para verificar a possibilidade de fissuração do concreto foram determinadas as tensões máximas de tração nos pontos de estudo e definida a resistência à tração do concreto. Nas simulações computacionais não foram considerados os efeitos da fluência, portanto, com base nas experiências pregressas adotou-se um fator de segurança igual a 1,2, ou seja, a resistência à tração do concreto foi reduzida em 20%, passando de 4,2 MPa para 3,5 MPa aos 28 dias.

Nos pontos em que as tensões de tração máximas superarem a resistência do concreto à tração ocorrem as fissuras.

As tensões de tração máximas nos pontos de estudo dos blocos de fundação com alturas iguais a 1, 2 e 3 metros e larguras da base (L) variáveis são apresentadas no Gráfico 27, Gráfico 28 e no Gráfico 29, respectivamente.

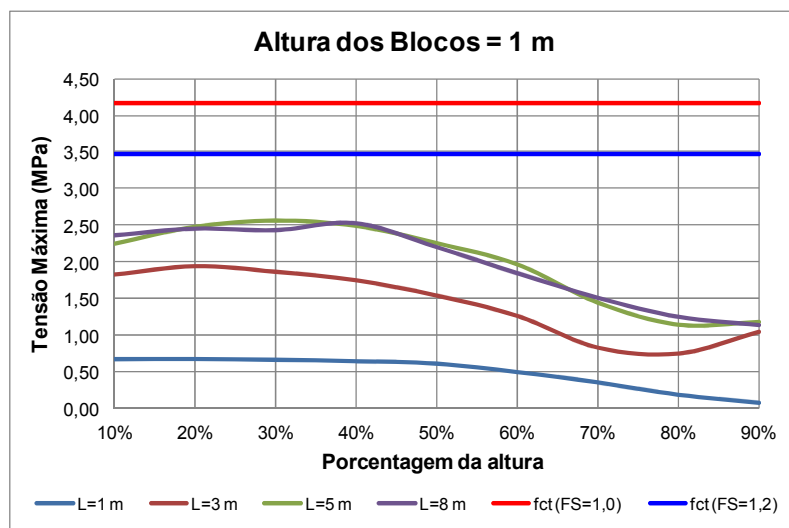


Gráfico 27. Tensões de tração máximas nos pontos de estudo dos blocos com alturas iguais a 1 metro (Concreto com f_{ck} igual a 35 MPa aos 28 dias).

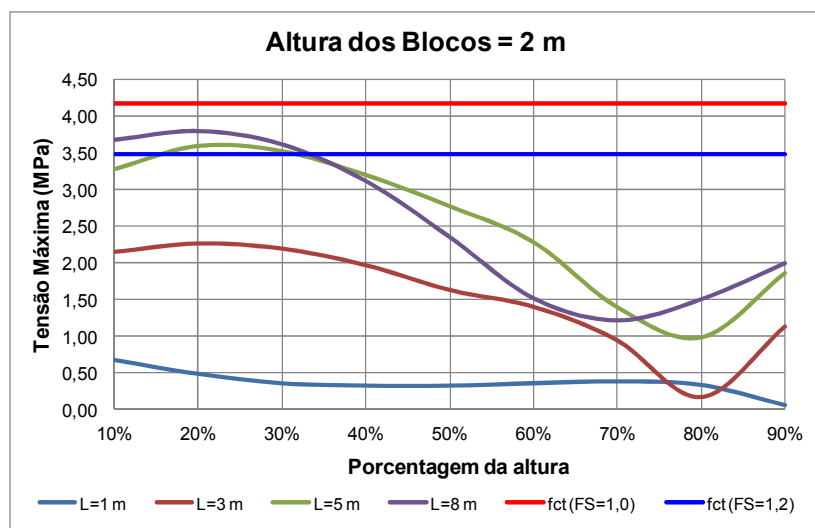


Gráfico 28. Tensões de tração máximas nos pontos de estudo dos blocos com alturas iguais a 2 metros (Concreto com f_{ck} igual a 35 MPa aos 28 dias).

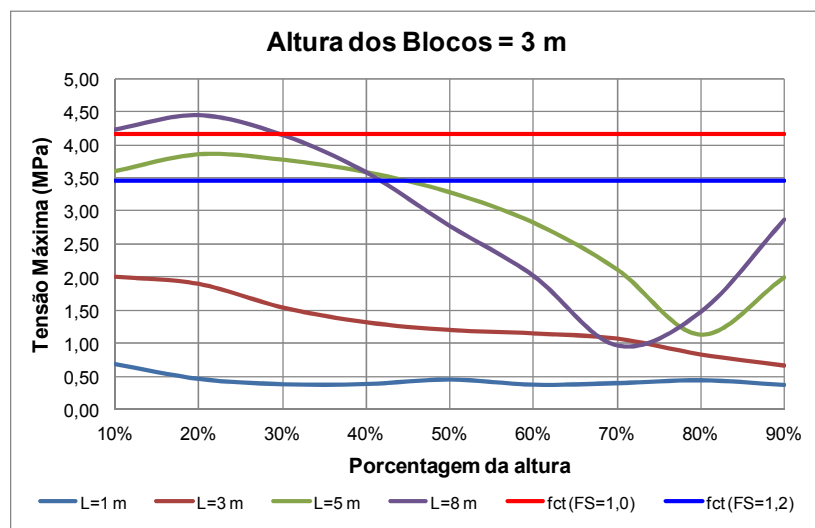


Gráfico 29. Tensões de tração máximas nos pontos de estudo dos blocos com alturas iguais a 3 metros (Concreto com f_{ck} igual a 35 MPa aos 28 dias).

No Gráfico 27, Gráfico 28 e no Gráfico 29 observa-se que alguns pontos localizados acima de 70% da altura dos blocos, ou seja, localizados próximo à superfície, apresentaram tensões de tração máximas crescentes, possivelmente devido à rápida dissipação de calor para o meio externo e que as tensões máximas de tração ocorrem nos pontos localizados entre 10% e 40% da altura e que os blocos com dimensões iguais a 5mx5mx2m, 5mx5mx3m, 8mx8mx2m e 8mx8mx3m apresentaram possibilidade de fissuração, considerando fator de segurança igual a 1,2. Portanto, os blocos de fundação com volumes de concreto iguais a 50, 75, 128 e 192 m³ possivelmente apresentarão fissuras de origem térmica.

No Gráfico 27, Gráfico 28 e no Gráfico 29 verifica-se que as tensões de tração máximas, de modo geral, nos blocos com largura da base (L) igual a 1 metro são inferiores às tensões de tração máximas dos blocos com largura da base igual a 3 metros e que estas são inferiores às tensões máximas de tração dos blocos com larguras da base iguais a 5 e 8 metros. Estas informações também podem ser verificadas no Gráfico 30.

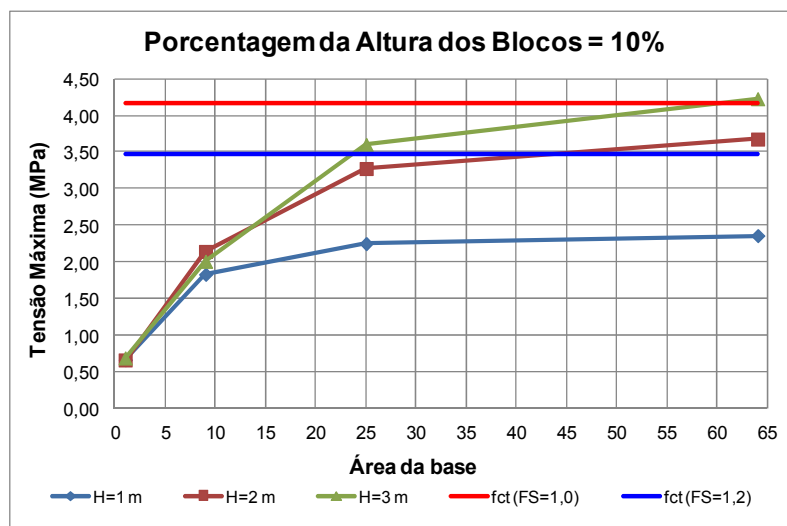


Gráfico 30. Tensões de tração máximas nos pontos de estudo localizados a 10 % da altura dos blocos (Concreto com f_{ck} igual a 35 MPa aos 28 dias).

Os blocos com larguras da base iguais a 5 e 8 metros apresentam valores de tensões máximas de tração próximos. Como as tensões de tração estão relacionadas ao grau de restrição (K_r), módulo de elasticidade do concreto, ao gradiente de temperatura, entre outros fatores, estes resultados podem ser justificados pela proximidade destes valores nestes blocos.

Conforme apresentado no Gráfico 24, Gráfico 25 e Gráfico 26, as temperaturas máximas dos blocos com alturas constantes e com larguras da base iguais a 3, 5 e 8 são próximas, portanto, os gradientes de temperatura, ou seja, a diferença entre a temperatura máxima e a temperatura de estabilização (temperatura ambiente) são praticamente os mesmos. Os valores de módulo de elasticidade do concreto na idade de estabilização dos blocos de mesma altura e com larguras da base iguais a 5 e 8 metros são idênticos, pois a estabilização da temperatura destes blocos ocorre após 28 dias de idade, portanto os valores de módulo de elasticidade são iguais a 30710 MPa, conforme apresentado no Gráfico 10. Além disso, para a mesma altura e larguras crescentes, a relação L/H aumenta e consequentemente o grau de restrição (K_r) também aumenta e quanto maior o valor de L/H , mais próximos são os valores de K_r , conforme apresentado na Figura 1.

4.4. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

As temperaturas máximas nos pontos de estudo são maiores para os blocos de concreto com f_{ck} igual a 35 MPa aos 28 dias do que para os blocos de concreto com f_{ck} igual a 30 MPa aos 28 dias, devido ao aumento do consumo de cimento para a obtenção do concreto com resistência à compressão mais elevada. Estas observações podem ser verificadas através do Gráfico 31, Gráfico 32 e no Gráfico 33.

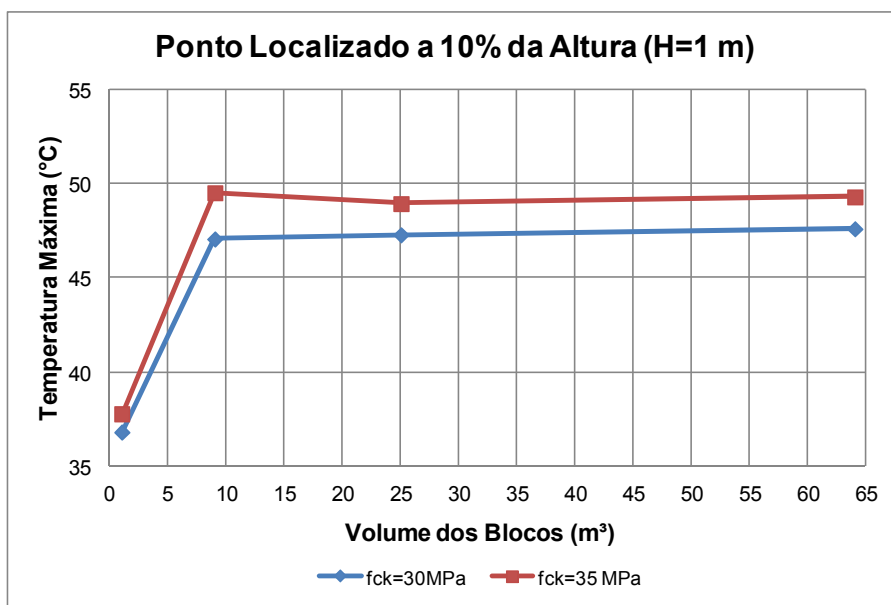


Gráfico 31. Temperaturas máximas nos pontos de estudo localizados a 10 cm acima da base.

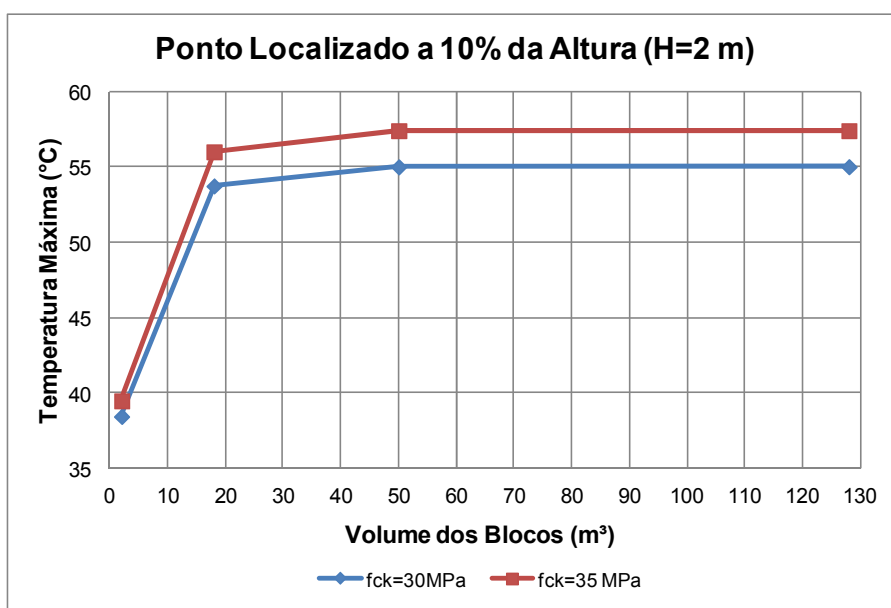


Gráfico 32. Temperaturas máximas nos pontos de estudo localizados a 20 cm acima da base.

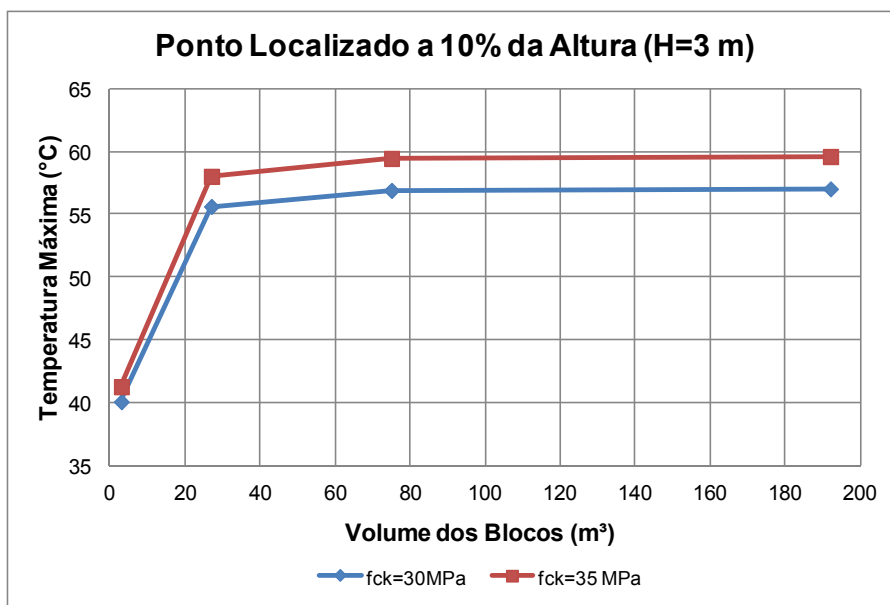


Gráfico 33. Temperaturas máximas nos pontos de estudo localizados a 30 cm acima da base.

No Gráfico 31, Gráfico 32 e no Gráfico 33 verifica-se que a partir de um determinado volume de concreto de blocos com mesma altura, propriedades, condições de contorno e de lançamento, as temperaturas máximas se estabilizam, portanto, a área da base passa a não influenciar significativamente nas temperaturas máximas do concreto a partir de determinados valores.

As tensões de tração máximas aumentam à medida que as dimensões dos blocos também aumentam e são maiores para os blocos de concreto com f_{ck} igual a 35 MPa aos 28 dias do que para os blocos de concreto com f_{ck} igual a 30 MPa aos 28 dias, conforme apresentado no Gráfico 34, Gráfico 35 e no Gráfico 36.

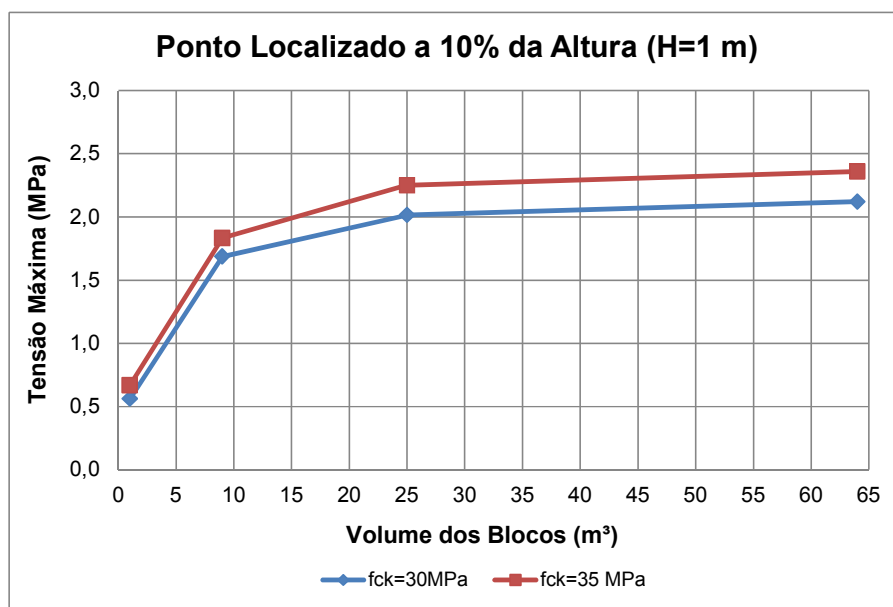


Gráfico 34. Tensões de tração máximas nos pontos de estudo localizados a 10 cm acima da base.

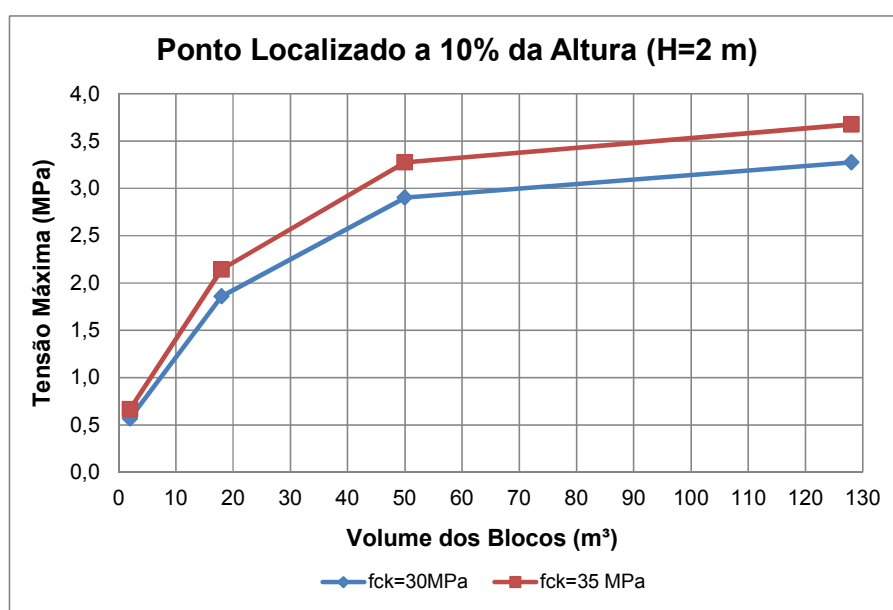


Gráfico 35. Tensões de tração máximas nos pontos de estudo localizados a 20 cm acima da base.

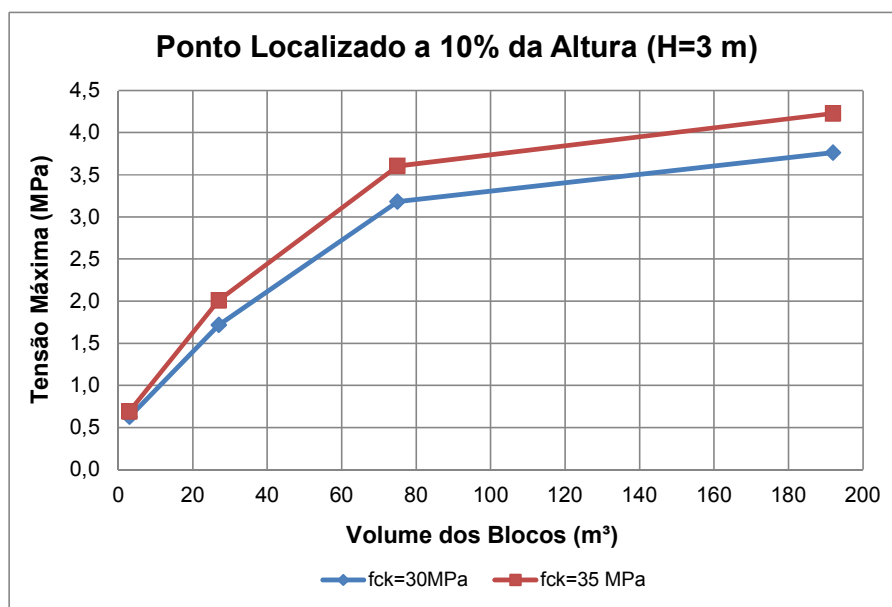


Gráfico 36. Tensões de tração máximas nos pontos de estudo localizados a 30 cm acima da base.

Verifica-se que quanto maior o volume de concreto dos blocos com altura constante, maior são as tensões de tração máximas e que a evolução das temperaturas e tensões de tração máximas dos blocos de concreto com fck igual a 30 MPa e 35 MPa aos 28 dias apresentam comportamentos similares, porém com valores distintos.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo apresentar-se à as considerações finais deste trabalho, bem como as sugestões para novos estudos na área.

5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os blocos simulados possibilitaram a verificação de algumas condições necessárias para o aparecimento de fissuras de origem térmica.

Verificou-se que as temperaturas máximas aumentam à medida que aumentam as dimensões dos blocos e que para a mesma altura, os blocos com larguras da base superiores a 3 metros apresentam temperaturas máximas praticamente constantes, portanto, a área da base passa a não influenciar significativamente nas temperaturas máximas do concreto, para blocos com mesma altura, propriedades, condições de contorno e de lançamento.

Além disso, observou-se que as temperaturas máximas são maiores nos pontos localizados entre 30% e 50% da altura dos blocos e as tensões máximas de tração são maiores nos pontos localizados entre 10% e 40% da altura dos blocos.

Os resultados obtidos nos blocos de concreto com fck igual a 30 MPa aos 28 dias apresentaram comportamentos similares aos resultados dos blocos de concreto com fck igual a 35 MPa aos 28 dias, porém, as temperaturas e tensões de tração máximas são maiores nos blocos com fck igual a 35 MPa aos 28 dias. Isto se deve principalmente pelo fato de que o consumo de cimento é maior no concreto com maior fck, portanto, as temperaturas são maiores e conseqüentemente as tensões.

Os blocos de fundação com dimensões iguais a 5mx5mx2m, 5mx5mx3m, 8mx8mx2m e 8mx8mx3m apresentaram possibilidade de fissuração, considerando fator de segurança igual a 1,2. Portanto, estes blocos que possuem volumes de concreto iguais a 50, 75, 128 e 192 m³, respectivamente, podem ser considerados como estruturas de concreto massa, devido à possibilidade de fissuração por origem térmica.

Verificou-se que para uma estrutura ser considerada massiva, o volume de concreto pode ser igual a 50 m³ e conclui-se que para verificar a possibilidade de ocorrência de manifestações patológicas de origem térmica não basta conhecer apenas a geometria do bloco, mas também é necessário ter conhecimento das propriedades do concreto, de seus materiais constituintes, das condições ambientais, das propriedades da fundação, propriedades das fôrmas, condições de cura e das metodologias construtivas. Para reduzir a possibilidade de fissuração de origem térmica, recomenda-se a realização de estudos térmicos para determinar os procedimentos necessários para a minimização deste problema potencial.

Os procedimentos utilizados para minimizar as fissuras de origem térmica são: redução do consumo de cimento, utilização de cimento com baixo calor de hidratação, utilização de materiais pozolânicos, utilizar gelo em substituição à água, resfriar os agregados, aumentar o intervalo de lançamento entre as camadas de concretagem, reduzir a altura das camadas de concreto, lançar o concreto quando as temperaturas ambientes são baixas, resfriamento do concreto através da colocação de tubulações embutidas, remoção precoce das formas ou utilização de formas de aço para contribuir para a dissipação de calor.

5.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se a continuação do trabalho através da simulação de blocos com diferentes dimensões, condições de contorno e propriedades do concreto, de modo a verificar as possibilidades de fissuração de origem térmica e estabelecer gráficos que possibilitem uma análise inicial por parte das construtoras para verificar a necessidade de adoção de procedimentos para minimizar esta manifestação patológica.

Sugere-se o estudo da influência de cada material constituinte do concreto na geração de calor e na ocorrência de fissuras de origem térmica.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI Committee 116. **Cement and Concrete Technology (ACI 116R-00)**. American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 2000.

ALVES, JOSÉ DAFICO. **Manual de tecnologia do concreto**. Goiânia GO, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Capacidade de exsudação em amostras de cimento**. ABCP. Relatório 13114. São Paulo, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimentos**. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12006: Cimento – Determinação do calor de hidratação pelo método da garrafa de Langavant – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12819: Concreto e argamassa - Determinação da elevação adiabática de temperatura**. Rio de Janeiro, 1993.

BELIE, N.; GROSSE, C.; BAERT, G. **Ultrasonic Transmission to Monitor Setting and Hardening of Fly Ash Concrete**. *Em pauta*: ACI Materials Journal. v.105, n.3, p. 221-226, 2008.

COUTINHO, A.S. **Fabrico e Propriedades do Betão**. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1973.

ERN, T.; HELENE, P. R. L. **Estudo das propriedades térmicas do concreto de média e alta resistência**. São Paulo: EPUSP, 2003. 32p. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP - Departamento de Engenharia Civil (BT/PCC/439).

FREITAS JR, J. A. *Materiais de Construção: Aglomerantes*. Universidade Federal do Paraná. Disponível em: <http://www.dcc.ufpr.br/wiki/images/6/6b/TC030_Aglomerantes_x.pdf>. Acesso em 15 out. 2012.

FURNAS. *Concretos: Ensaios e Propriedades*. São Paulo: Ed. PINI, 1997

GAMBALE, E. A. et al. **Análise estatística dos parâmetros que intervêm no fenômeno térmico do concreto massa**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 52., 2010, Fortaleza.

KAVAMURA, E. E. **Estudo do comportamento termo-estrutural bidimensional de barragens de concreto utilizando o Método dos Elementos Finitos**. 2005. 137 f. Dissertação (Mestrado em Ciências)-Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

LERCH, W. **Hot Cement and Hot Weather Concrete Tests**, IS015, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, 1955.

MAGALHÃES, A. G. et al. **Análise da microestrutura e das propriedades mecânicas de concretos dosados com cimentos fabricados com diferentes teores de escória de alto-forno**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 48., 2006, Rio de Janeiro.

MARCELLI, M. **Sinistros na Construção Civil**. São Paulo, 2007.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*. 3. ed. São Paulo: Ed. IBRACON, 2008.

MUNHOZ, F. A. C. **Cimento Portland**: curso intensivo de tecnologia básica do concreto, 13-15 de mar. de 2012. 97 f. Notas de Aula. São Paulo: ABCP, 2012.

PEDERSEN, E. S. *B4cast*: Manual do usuário. Carolina do Sul. 2009.

PEREIRA, P. N.; KUPERMAN, S. C. **Estudo das propriedades dos concretos massa e estrutural, utilizando cimento Portland pozolânico**. São Paulo: EPUSP, 2008. 12p. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP - Departamento de Engenharia Civil (BT/PCC/477).

PREFEITURA DE SÃO PAULO. **Aumenta a Temperatura Média em São Paulo**. Informes Urbanos. SP 2040 N°9-Junho 2012

PRISZKULNIK, S. **Fissuração do concreto por ações térmicas autógenas e elementos para terapêutica preventiva**. In: COLÓQUIO PATOLOGIA DO CONCRETO E RECUPERAÇÃO DE ESTRUTURAS, 1978, São Paulo.

PRISZKULNIK, S. **O calor de hidratação do cimento Portland e a execução das estruturas de concreto**. In: SIMPÓSIO DE APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA DO CONCRETO, 8., 1985, São Paulo.

RODRIGUES, P. P. F. **Parâmetros de dosagem do concreto**. 4. ed. São Paulo, Associação Brasileira de Cimento Portland, 2005. 36p. (ET-67).

SILVA, C. O.; BATTAGIN, A. F. Impacto da temperatura do cimento na temperatura do concreto. **Revista Concreto e Construções**, São Paulo, n. 65, p. 19-24, jan./mar. 2012.

TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. **Dosagem dos concretos de cimento Portland**. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. 1v. p. 415-451.

WATANABE, P. S. **Concretos Especiais**: Propriedades, Materiais e Aplicações. 2008. 192p. Relatório Final de Pesquisa (Iniciação Científica da Faculdade de Engenharia)-Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2008.

WENDLER, A. P.; TURRA, C.; SERIGHELI JUNIOR, I. **Estudo de fissuração térmica do concreto em barragens**. 2007. 78 f. Monografia (Especialização em Patologia em Construção Civil)-Universidade Tuiuti do Paraná, Curitiba, 2007.