

# **ANÁLISE SIMPLIFICADA DO POTENCIAL DE DEF E FISSURAÇÃO TÉRMICA<sup>1</sup>**

Caio Farto Farinacio – caiofartofarinacio@hotmail.com

Lígia Vitória Real (Orientadora) – ligia.real@mackenzie.com.br

## **RESUMO**

Concreto massa se refere as estruturas as quais se devem realizar práticas para que sejam minimizados os riscos de formação de etringita tardia (DEF) e fissuração de origem térmica. O objetivo deste artigo foi desenvolver um método expedito, considerando geometria, tipo de cimento e classe de resistência do concreto, para identificar se é necessário realizar um estudo térmico de uma determinada estrutura de concreto. Ou seja, identificar, a partir das características da estrutura, se a peça pode ser considerada como sendo de concreto massa. Para a análise, foram realizadas simulações utilizando *software* de elementos finitos com geometrias variando suas dimensões de 0,5m até 3m e classes de resistência C30, C40 e C50. Foram realizadas correlações utilizando o módulo de superfície, a temperatura máxima atingida e a tensão principal máxima de cada modelo. Através das análises realizadas, foi possível prever o grau de risco de uma estrutura poder ser considerada ou não em concreto massa. Ainda, foi possível identificar que a massividade dos elementos não está somente relacionada a uma variável. Identificou-se que o bloco a partir de 1m<sup>3</sup> pode ser considerado concreto massa, se a classe de resistência for C50 em condições específicas. Recomenda-se que essa análise seja realizada ainda em fase de projeto a fim de alertar os construtores e/ou elaborar alternativas para minimizar o risco.

Palavras-chave: Concreto massa. Etringita tardia. Fissuração de origem térmica.

## **REDUCED ANALYSIS OF DEF AND THERMAL CRACKING POTENTIAL**

### **ABSTRACT**

Mass concrete refers to structures in which efforts must be made to minimize the risks of delayed ettringite formation (DEF) and thermal cracking. The research objective was to develop a fast method, considering geometry, cement type and concrete strength class, to identify when it is necessary to have a thermal study of a concrete structure. In other words, to identify, based on the characteristics of the structure, if it can be considered as being made of mass concrete. For the analysis, simulations were made using finite element software with geometries ranging from 0.5m to 3m, using strength

---

<sup>1</sup> Artigo do Trabalho de Conclusão de Curso, Graduação em Engenharia Civil, EE, UPM, São Paulo, 2021.

class C30, C40 and C50. Correlations were made using the surface modulus, a maximum temperature reached and a maximum principal stress of each model. Through the analyzes, it was possible to predict the degree of risk of a structure being considered as a massive concrete or not. It was also possible to identify that the risk of being massive concrete is not related to a single variable. It was identified that the structure from 1m<sup>3</sup> can be considered as a mass concrete structure, considering the C50 strength class under specific conditions. It is recommended that this analysis be made while still in the design phase to alert builders and/or design alternatives to minimize the risk.

Keywords: Mass concrete. Delayed ettringite formation (DEF). Thermal cracking.

## 1 INTRODUÇÃO

Concreto massa é definido como qualquer volume de concreto de dimensões suficientes para requerer que sejam tomadas medidas para enfrentar a geração de calor oriunda da hidratação do cimento e minimizar a fissuração originada pela mudança volumétrica (ACI COMMITTEE 207, 2007).

A primeira manifestação patológica observada em concreto massa é a fissuração de origem térmica, que ocorre quando a tensão de tração resultante da variação de volume devido ao resfriamento do concreto supera a resistência à tração direta do material. Essa fissuração depende do módulo de elasticidade, do grau de restrição, do coeficiente de expansão térmica, da temperatura máxima atingida em relação a temperatura ambiente e a relaxação da tensão decorrente da fluência do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A Figura 1 e a Figura 2 trazem um estudo de caso analisado por Sousa *et. al.* (2014), onde foram constatadas fissuras de origem térmica, variando de 5 mm a 10 mm, em blocos de fundação de um empreendimento na cidade de Goiânia. Os volumes dos blocos onde ocorreram a manifestação patológica variam de 9,3m<sup>3</sup> a 11,8m<sup>3</sup>. O concreto utilizado possui  $f_{ck}$  igual a 35MPa, com consumo de 440kg/m<sup>3</sup> de cimento CP II F 32. A autora conclui que as fissurações são por retração térmica e podem estar relacionadas ao grau de restrição dos blocos e ao  $f_{ck}$  fornecido acima do especificado, ocasionando em um maior consumo de cimento e uma maior geração de calor.

Figura 1 – Bloco de fundação apresentando fissuração de origem térmica.



Fonte: Cascudo (2014) *apud* Sousa *et. al.* (2014).

Figura 2 – Bloco de fundação apresentando fissuração de origem térmica.



Fonte: Sousa *et. al.* (2014).

A Figura 3 mostra como realizou-se o processo de recuperação estrutural dos blocos, através de injeção de resina epóxi e em alguns casos conjuntamente com um encamisamento estrutural, onde as fissuras eram maiores.

Figura 3 – Recuperação do bloco de fundação. (a) Bloco pronto para receber injeção de resina epóxi; (b-1) e (b-2) Bloco sendo recuperado por encamisamento estrutural.



Fonte: Sousa *et. al.* (2014).

Outra manifestação patológica que pode ser potencializada pela alta temperatura nas estruturas de concreto massa é a DEF (*Delayed Ettringite Formation* – Formação de etringita tardia). A formação da etringita primária se dá durante o primeiro período de hidratação do cimento e não está relacionada um ataque, e sim a um processo normal de hidratação do cimento. Porém, quando o concreto é exposto a elevadas temperaturas, a etringita primária pode não se formar por completo, propiciando a formação posterior da etringita, quando as demais reações de hidratação já ocorreram e o concreto está no estado endurecido. Esta formação tardia de cristais se dá lentamente durante anos levando ao aumento de esforços internos de tração, promovendo a perda de resistência mecânica e um estado de fissuração na estrutura (MEHTA; MONTEIRO, 2014; SCHOVANZ, 2019; TAYLOR; FAMY; SCRIVENER, 2001).

Os casos mais comuns encontrados na literatura são em peças de elementos pré-moldados, devido ao processo de cura térmica em temperaturas elevadas, ilustrados na Figura 4. Porém, alguns casos em que a alta temperatura se deve a geração de calor da hidratação do cimento já foram registrados (MELO, 2010; TAYLOR; FAMY; SCRIVENER, 2001).

Figura 4 – Dormentes fissurados devido a DEF.



Fonte: Kuperman e Hasparyk (2019).

O livro “Cuidados na Execução de Fundações em Concreto-Massa” (J. R. DE CARVALHO, 2020) traz ao leitor uma série de casos em que se constatou a fissuração devido a reação álcali-agregado e/ou problemas térmicos em blocos de fundação. Segundo o autor, os casos foram constatados a partir de 2005, após uma forte tomada de decisão dos meios técnicos locais, no sentido de se realizar inspeções sistemáticas e periódicas em fundações de edifícios, mesmo que a superestrutura não apresente nenhum sintoma aparente. A Figura 5 ilustra alguns casos constatados.

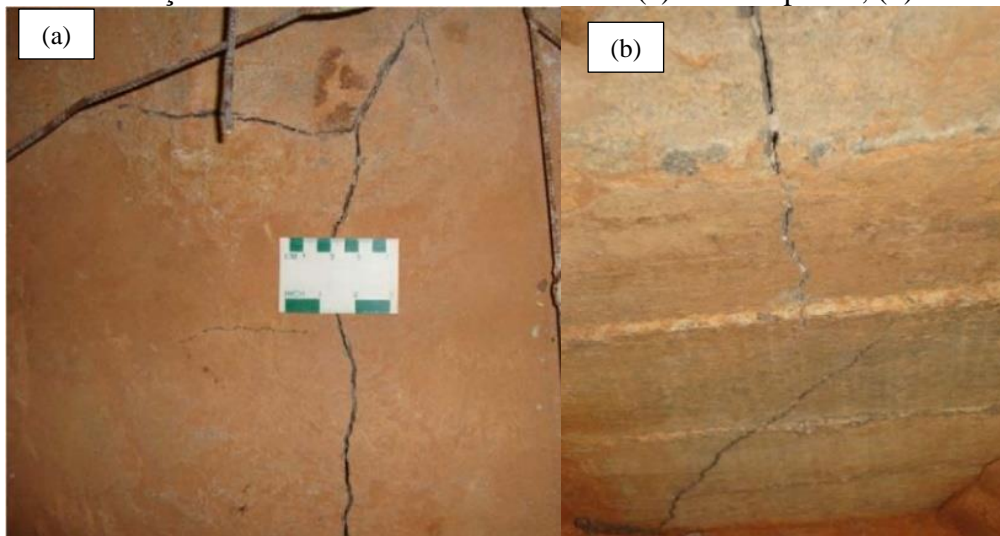
Figura 5 – Blocos de fundação e coroamento fissurados. (a) Edifício de 30 pav., descoberto em 2011; (b) Ponte Paulo Guerra, descoberto em 2001; (c) Edifício de 28 pav., descoberto em 2005; (d) Edifício de 32 pav., descoberto em 2013; (e) Edifício de 26 pav., descoberto em 2018.



Fonte: (J. R. DE CARVALHO, 2020).

Um caso de relevante importância ocorrido no Brasil foi publicado por Hasparyk *et al.* (2012), onde os autores mostram o poder catastrófico das reações expansivas no concreto. O caso é de um bloco de fundação onde pelas análises do quadro fissuratório em conjunto com ensaios de reconstituição do traço, análises petrográficas do agregado e do concreto, concluiu-se que o bloco foi afetado pela RAA (reação álcali-agregado), devido ao agregado reativo, e pelo fenômeno da DEF, devido ao bloco poder ter atingido, durante as reações de hidratação, a temperatura na ordem de 80°C. A Figura 6 mostra o quadro fissuratório observado.

Figura 6 – Fissuração observada no bloco de concreto. (a) Vista superior; (b) Vista lateral.



Fonte: Hasparyk *et al.* (2012).

Estima-se que há inúmeros casos de DEF em blocos de fundação no país, comprometendo a resistência mecânica e durabilidade das estruturas por permitir a entrada de agentes agressivos devido ao quadro fissuratório. Porém, a constatação da manifestação patológica é dificultada pela maioria das fundações serem aterradas logo após sua construção e a falta de inspeções no decorrer da vida útil dessas estruturas.

Há uma dificuldade por parte dos profissionais da construção civil, quando da análise do potencial da DEF e da fissuração de origem térmica das estruturas de concreto. No Brasil, não há, até a presente data deste trabalho, o conceito normatizado sobre o que é uma estrutura de concreto massa, como e quando devem ser tomadas precauções para que manifestações patológicas de origem térmica não ocorram nas estruturas de concreto. Dentro deste contexto, as perguntas que norteiam o desenvolvimento deste artigo são: quais são as características que a definem uma estrutura como de concreto massa? A partir de quais dimensões, resistência mecânica, tipo e consumo de cimento deve-se realizar estudo para evitar fissuração térmica e DEF?

Esta pesquisa teve como objetivo geral desenvolver um método expedito, considerando geometria, tipo de cimento e classe de resistência do concreto, para identificar se é necessário realizar

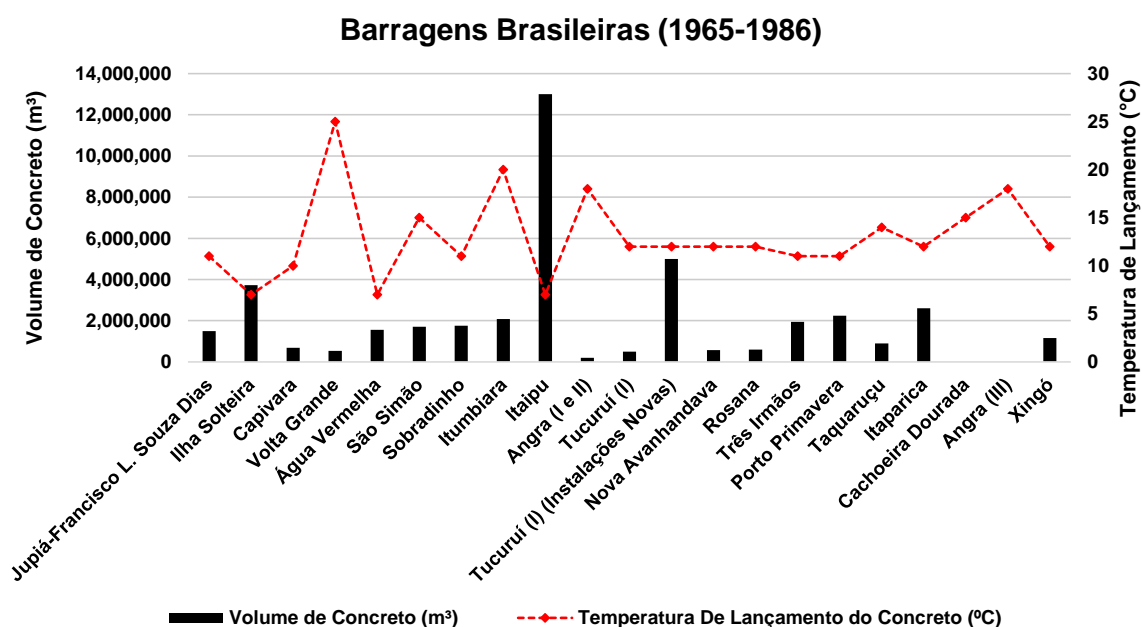
um estudo térmico de uma determinada peça de concreto. Ou seja, identificar, a partir das características da estrutura, se a peça pode ser considerada como sendo de concreto massa.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Pela definição de concreto massa, entende-se sendo como qualquer volume de concreto onde uma combinação de dimensões do elemento sendo concretado, as condições de contorno, as características da dosagem e as condições ambiente possam levar a tensões térmicas indesejáveis, fissuração, reações químicas deletérias e redução da resistência mecânica a longo prazo como resultado de elevadas temperaturas do concreto devido ao calor de hidratação.

Nos projetos de barragens, onde o volume de concreto das estruturas é expressivamente significativo quando comparados a obras de edificação, o conceito de concreto massa, seus desafios e possíveis manifestações patológicas são amplamente difundidos. Tem-se conhecimento que o primeiro resfriamento artificial do concreto, com o intuito de minimizar as tensões de origem térmica provenientes das reações de hidratação do cimento foi no ano de 1931, através da pós-refrigeração, na Barragem Hoover, localizada entre os estados de Nevada e Arizona, nos Estados Unidos (HOOVER, 2015). No Brasil, traz-se o histórico do uso de gelo no concreto massa em barragens desde 1965, mostrado na Figura 7, com destaque para a barragem de Itaipu, onde o volume de concreto pré-refrigerado lançado totalizou-se em aproximadamente 13 milhões de m<sup>3</sup>.

Figura 7 – Histórico do concreto massa em barragens brasileiras.



Fonte: Adaptado de Andriolo e Skwarczynski (1988).

Contudo, não são somente em estruturas de barragens onde há o emprego de concreto massa, bem como sabe-se que o volume de concreto não é um fator único para que a estrutura de concreto venha ter a necessidade de precauções quanto a sua geração de calor. Estruturas de fundação, sejam

essas em obras de infraestrutura ou obras verticais, paredes, pilares ou lajes espessas também podem ser classificadas como sendo estruturas em concreto massa (FUNAHASHI JR. *et al.*, 2010; FUNAHASHI JR. *et al.*, 2011; FUNAHASHI *et al.*, 2012; VICENTE *et al.*, 2014; FUNAHASHI JR. *et al.*, 2018; VICENTE *et al.*, 2019).

Estudos apontam que quando a menor dimensão da estrutura é igual a 1m (volume mínimo de 1m<sup>3</sup>), seu interior é submetido a uma elevação de temperatura praticamente adiabática, fazendo que durante a hidratação do cimento, a estrutura possa aumentar em 70°C, e dependendo da sua temperatura de lançamento, possa chegar em temperaturas extremamente preocupantes (ACKER; TORRENTI; GUÉRINET, 2014). Essa conclusão vai de encontro com a definição da NBR 15577-1 (ABNT, 2018) de que peça de concreto maciça é a que sua menor dimensão é maior ou igual a 1m.

## 2.1 FISSURAÇÃO DE ORIGEM TÉRMICA

A fissuração de origem térmica se dá pelas variações de volume do concreto devido a mudança de temperatura. O grau de restrição do elemento, isto é, o quão livre a peça está para se movimentar, diz respeito ao nível de deformação que a peça irá sofrer.

Admitindo um elemento de concreto, livre de qualquer restrição externa e sujeito a variação térmica e volumétrica uniforme, seria possível que o elemento se dilatasse até o pico de temperatura ser atingido. Em seguida, iniciado o resfriamento, haveria contração uniforme do elemento sem geração de tensões e, portanto, sem fissuração. Entretanto, essa situação é apenas hipotética, estando a maioria dos elementos de concreto sujeitos a restrições, salvo elementos de pequenas dimensões (COUTO, 2018).

A tensão por tração no resfriamento do concreto pode inicialmente ser considerada seguindo a Equação (1) (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

$$\sigma = K_r \times \frac{E}{1+\varphi} \times \alpha \times \Delta T \text{ [MPa]} \quad (1)$$

em que:

$K_r$  = grau de restrição;

$E$  = módulo de elasticidade;

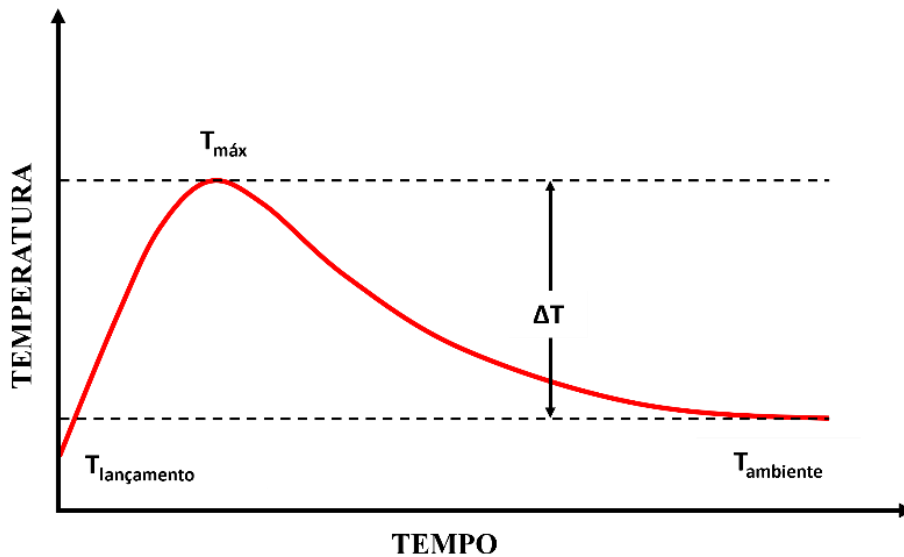
$\alpha$  = coeficiente de expansão térmica;

$\varphi$  = coeficiente de fluência;

$\Delta T$  = queda de temperatura ou resfriamento ( $T_{\text{máx.}} - T_{\text{amb.}}$ ).

A Figura 8 mostra como ocorre a variação de temperatura no interior do concreto ao decorrer do tempo.

Figura 8 – Esquema de peças de concreto submetidas a variações térmicas.



Fonte: Adaptado de (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

## 2.2 DEF (*DELAYED ETTRINGITE FORMATION* – FORMAÇÃO DE ETRINGITA TARDIA)

A chamada etringita tardia ou, internacionalmente, DEF (*Delayed Ettringite Formation*) pode danificar de maneira severa uma estrutura de concreto. A etringita primária (trisulfoaluminato de cálcio) consiste em um produto comum formado durante a hidratação do cimento a partir de reações do  $C_3A$  (aluminato tricálcico) e do  $C_4AF$  (ferroaluminato tetracálcico) com a gipsita, na fase ainda plástica do concreto. Entretanto, há indícios de que se a temperatura do interior do concreto atingir valores superiores a  $65^{\circ}C$  os sulfatos podem ser incorporados a outras fases do cimento. Após o endurecimento do concreto, caso haja presença de água pode ocorrer a formação de uma etringita secundária com aumento de volume e gerando conseqüentemente uma expansão deletéria. A DEF é definida como uma formação de etringita no concreto após seu endurecimento, sem que haja fonte externa de sulfatos, apenas suprimento de água (MEHTA; MONTEIRO, 2014; GODART, 2017; SCHOVANZ, 2019).

O Quadro 1 apresenta os principais fatores envolvidos da ocorrência de DEF.



Quadro 1 – Fatores envolvidos na ocorrência de DEF

<b>FATOR</b>	<b>CARACTERÍSTICAS</b>
<b>CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS CONSTITUINTES</b>	
<b>Cimento</b>	A quantidade de C <sub>3</sub> S, C <sub>3</sub> A, SO <sub>3</sub> , MgO e a finura do cimento (SCHMALZ, 2018).
<b>Agregado</b>	Quanto maior a área específica do agregado maior a probabilidade de ocorrência da DEF (BRYANT, 2011).
<b>Adições</b>	Adições pozolânicas e escória podem reduzir, ou até suprimir a expansão em concretos curados com calor (SCHMALZ, 2018). Porém, precisa ser amplamente estudado e verificado se as adições minerais podem mitigar as expansões ocasionadas pela DEF em concreto (SUN e CHEN, 2018).
<b>CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO</b>	
<b>Relação água/cimento</b>	Quanto menor a relação a/c maior a quantidade de cimento e, por isso, maior a propensão à DEF (BRYANT, 2011).
<b>CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO</b>	
<b>Quantidade de álcalis</b>	A presença de álcalis diminui a estabilidade na formação da etringita primária, especialmente quando o concreto está sujeito a altas temperaturas, liberando sulfatos propícios a formar etringita no material endurecido, após o resfriamento. No entanto, a presença de álcalis nas idades iniciais é propensa ao desenvolvimento de DEF, enquanto no concreto endurecido irá dificultar ou até mesmo evitar a DEF (MARTIN <i>et. al.</i> , 2012).
<b>Fissuras pré-existentes</b>	Fissuras pré-existentes, que podem ser oriundas da reação álcali-agregado, por exemplo, propiciam a presença de espaços favoráveis à DEF (COLLEPARDI, 2003).
<b>Condições de cura e armazenamento</b>	As condições de cura podem modificar os tipos de hidratos formados para um mesmo cimento. O tempo de pré-cura ótimo é considerado até 4 horas, posteriormente, haverá formação de cristais de monossulfato e restrições na expansão (SCHMALZ, 2018).

Fonte: Adaptado de Schovanz (2019).

### 2.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL TÉRMICA

A utilização de *softwares* em elementos finitos visa promover resultados mais rápidos e precisos, podendo fornecer em qualquer ponto e tempo a temperatura atingida e o esforço atuante no ponto proveniente das reações de hidratação do cimento. Esses dados são utilizados para a definição de planos de concretagem, necessidade ou não de refrigeração, e alterações no traço de concreto a ser empregado.

O *software* de elementos finitos b4cast foi elaborado por Erik Pedersen em conjunto com a empresa ConTech Analysis ApS na Noruega. Vários fatores integram o modelo matemático como, por exemplo, a temperatura de lançamento do concreto, velocidade de lançamento do concreto, condições ambientais (temperatura ambiente e velocidade do vento), características do cimento,

dosagem do concreto utilizado, características térmicas e mecânicas do concreto, geometria da estrutura, entre outros (CONTECH ANALYSIS, 2021).

A malha de elementos finitos é automaticamente formada por elementos tetraédricos. Os elementos tetraédricos são formados com 10 nós para análise térmica e 20 nós (cada um com 3 graus de liberdade) para análise das tensões. O cálculo tridimensional de temperaturas, no elemento de concreto, pressupõe que a propagação de calor ocorre na seção transversal e longitudinal simultaneamente, aproximando-se de uma situação real.

Através da comparação entre a evolução das temperaturas calculadas através do software b4cast e a evolução vinda da leitura de termopares instalados no interior das peças concretadas, pode-se concluir que os resultados apresentaram boa representatividade, comprovando a utilidade de sua aplicação para realização deste tipo de estudo (FUNAHASHI JR. *et al.*, 2010; FUNAHASHI JR. *et al.*, 2011; FUNAHASHI *et al.*, 2012; VICENTE *et al.*, 2014; FUNAHASHI JR. *et al.*, 2018; VICENTE *et al.*, 2019).

Para avaliar o risco de fissuração térmica nas primeiras idades, compara-se a evolução das tensões principais máximas solicitantes com a evolução da resistência direta do concreto. Caso as tensões solicitantes superem a resistência do material, ocorre a fissuração.

## 2.4 MÓDULO DE SUPERFÍCIE

O módulo de superfície ( $m_s$ ) é usado como uma classificação de estruturas de concreto quanto a sua massividade, isto é, risco de manifestações patológicas a serem desenvolvidas devido as altas temperaturas no interior da estrutura decorrente do processo de hidratação do cimento (FLAGA 1990 *apud* KANAVARIS *et al.*, 2021). Porém, não são considerados neste cálculo outros fatores como a dosagem e tipo de cimento. Define-se o módulo de superfície sendo a relação entre a superfície da estrutura exposta ao ambiente pelo volume total, seguindo a equação 2.

$$m_s = \frac{S}{V} \quad [m^{-1}] \quad (2)$$

Os autores classificam:

- a) Para  $m_s \leq 2 \text{ m}^{-1}$ , as estruturas são classificadas como massivas, com um predomínio de impacto de tensões térmicas e condições quase adiabáticas no núcleo;
- b) Para  $2 \text{ m}^{-1} < m_s < 15 \text{ m}^{-1}$ , as estruturas são classificadas como semimassivas com um impacto térmico semelhante as tensões solicitantes de secagem;
- c) Para  $m_s \geq 15 \text{ m}^{-1}$ , as estruturas são classificadas como estruturas de concreto de parede fina com impacto desprezível de deformações térmicas.

Existem, na literatura apresentada por Kanavaris *et. al.* (2021), outros coeficientes que correlacionam a geometria das estruturas quanto a sua massividade, contudo o módulo de superfície é o coeficiente de maior praticidade, podendo ser obtido através de uma medição.

### 3 METODOLOGIA

A fim de prever o risco de formação de DEF e fissuração térmica pela conceitualização de concreto massa, as geometrias analisadas foram definidas variando as dimensões largura, comprimento e altura com os valores 3m, 1,5m, 1m e 0,5m, totalizando 40 geometrias, com módulo de superfície ( $m_s$ ) variando de 10 a  $1,7m^{-1}$ . Três classes de concreto foram definidas para as simulações (C30, C40 e C50), considerando o cimento CP II E 40. Considerou-se nas simulações o lançamento do concreto a 35°C. Para estimar o consumo de aglomerante de cada traço, analisou-se a intensidade de ligante de traços onde foi utilizado este cimento, apresentados na Tabela 1. Os traços são do banco de dados do autor, desenvolvidos e aplicados por concreteiras distintas da região de São Paulo-SP.

Tabela 1 – Traços utilizados para definição do consumo de cimento.

$f_{ck}$ (MPa)	20 (24h)	40	45	45	50	50
Cimento CP II E 40 (kg/m <sup>3</sup> )	400	297	335	332	342	334
Sílica (kg/m <sup>3</sup> )	0	11	13	0	30	13
Areia Natural (kg/m <sup>3</sup> )	534	505	475	344	346	496
Areia Artificial (kg/m <sup>3</sup> )	356	337	317	453	457	330
Brita 0 (kg/m <sup>3</sup> )	199	54	325	317	315	52
Brita 1 (kg/m <sup>3</sup> )	794	1037	759	740	735	1000
Água (kg/m <sup>3</sup> )	190	184	193	186	186	193
Aditivo (kg/m <sup>3</sup> )	3,40	4,15	4,32	3,35	3,35	3,55
R1 (MPa)	26,5	-	12,7	-	-	-
R3 (MPa)	42,1	22,3	26,4	33,4	33,9	-
R7 (MPa)	48,0	32,2	36,1	40,2	43,8	-
R28 (MPa)	65,5	46,2	54,3	53,2	58,4	56,7
Aglomerante (kg/m <sup>3</sup> )	400	308	348	332	372	347
Relação ag/c	0,48	0,60	0,55	0,56	0,50	0,56
Eficiência Mecânica (kg/m <sup>3</sup> /MPa)	6,1	6,7	6,4	6,2	6,4	6,1
Eficiência Mecânica Média (kg/m <sup>3</sup> /MPa)	6,3					

Fonte: Autor (2021).

Com a eficiência mecânica de 6,3 kg/m<sup>3</sup>/MPa, estimou-se o consumo de aglomerante para cada classe de resistência, considerando a resistência de dosagem ( $f_{cj}$ ), segundo a NBR 12655 (ABNT, 2015), com  $S_d$  de 4 MPa, apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Consumos de aglomerante estimados.

$f_{ck}$ (MPa)	30	40	50
Eficiência mecânica estimada (kg/m <sup>3</sup> /MPa)		6,3	
$f_{c28}$ (MPa) $f_{cj}=f_{ck}+1,65*S_d$	36,6	46,6	56,6
Consumo de aglomerante estimado (kg/m <sup>3</sup> )	231 <sup>(1)</sup>	294	358

(1) Adotou-se 260 kg/m<sup>3</sup> segundo classe de agressividade ambiental I da NBR 12655 (ABNT, 2015)

Fonte: Autor (2021).

A classe de resistência C30 apresentou consumo de aglomerante estimado em 231 kg/m<sup>3</sup>. A NBR 12655 (ABNT, 2015) estabelece limites mínimos de consumo de cimento devido a classe de agressividade ambiental, a fim de minimizar o risco de ingressos de agentes agressivos e iniciar a corrosão das armaduras. No caso de blocos de fundação, pode-se considerar que não há disponibilidade de oxigênio suficiente (elemento essencial para o início da corrosão das armaduras por carbonatação) por estarem em ambientes confinados. Com essa consideração, pode-se adotar classe de agressividade I, sendo 260 kg/m<sup>3</sup> o limite mínimo de consumo de cimento, e adotado nas simulações (J. R. DE CARVALHO, 2020).

As características mecânicas e elásticas dos traços são apresentados na Tabela 3. A evolução das resistências no tempo foi estimada segundo Battagin *et al.* (2014). A resistência a tração direta e o módulo de elasticidade foram estimados segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), considerando o agregado como granito. Ainda, a massa específica do concreto foi estimada sendo 2400 kg/m<sup>3</sup> e o coeficiente de Poisson em 0,20, conforme a NBR 6118 (ABNT, 2018).

Tabela 3 – Evolução estimada da resistência à compressão, à tração e módulo de elasticidade.

C30			
Idade (dias)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência a Compressão (MPa)	Resistência a Tração (MPa)
1	12	7,2	1,1
3	22	21,6	2,3
7	26	28,1	2,8
28	30	36,6	3,3
63	31	38,7	3,4
C40			
1	14	9,2	1,3
3	26	27,5	2,7
7	30	35,8	3,3
28	35	46,6	3,9
63	36	49,3	4,0
C50			
1	15	11,1	1,5
3	29	33,4	3,1
7	34	43,5	3,7
28	39	56,6	4,4
63	40	59,9	4,6

Fonte: Autor (2021).

As características térmicas dos materiais foram estimadas considerando as dosagens apresentadas anteriormente e são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Calor específico, condutividade térmica e coeficiente de dilatação térmica estimados.

Calor específico (kJ/kg°C)	Condutividade térmica (kJ/m.h.°C)	Coeficiente de dilatação térmica (10 <sup>-6</sup> /°C)
0,96	9,0 <sup>(1)</sup>	10

Fonte: Gambale *et al.* (2010) e NBR 6118 (ABNT, 2014).

A evolução do calor de hidratação do cimento CP II E 40 foi estimada a partir dos dados de ensaio realizado em 2021 e são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Calor de hidratação – CP II E 40.

Resultados de ensaio (J/g)								
0h	6h	12h	24h	41h	48h	72h	120h	168h
0	50	288	353	355	355	355	356	365

Fonte: Autor (2021).

A elevação adiabática do concreto foi calculada através da fórmula de Rastrup, apresentada na Equação (3), a partir dos valores de calor de hidratação do cimento considerado nos estudos.

$$\Delta T = \frac{C_c \times CH}{\gamma \times c} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3)$$

Onde:

$\Delta T$  = Elevação adiabática (°C)

$\gamma$  = Massa específica (kg/m<sup>3</sup>)

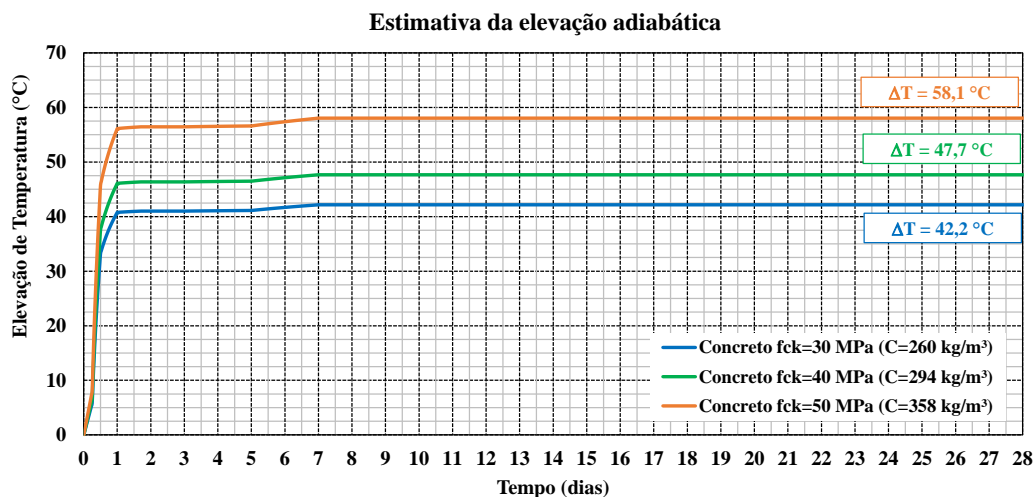
$c$  = Calor específico (Kj/Kg.°C)

CH = Calor de hidratação (J/g)

Cc = Consumo de cimento (kg/m<sup>3</sup>)

As curvas de elevação adiabática estimadas são apresentadas na Figura 9.

Figura 9 – Elevação adiabática dos concretos C30, C40 e C50.



Fonte: Autor (2020).

As características adotadas para a base de apoio considerando restrição total, foram estimadas, considerando apoiada em estacas e são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Características da base de apoio.

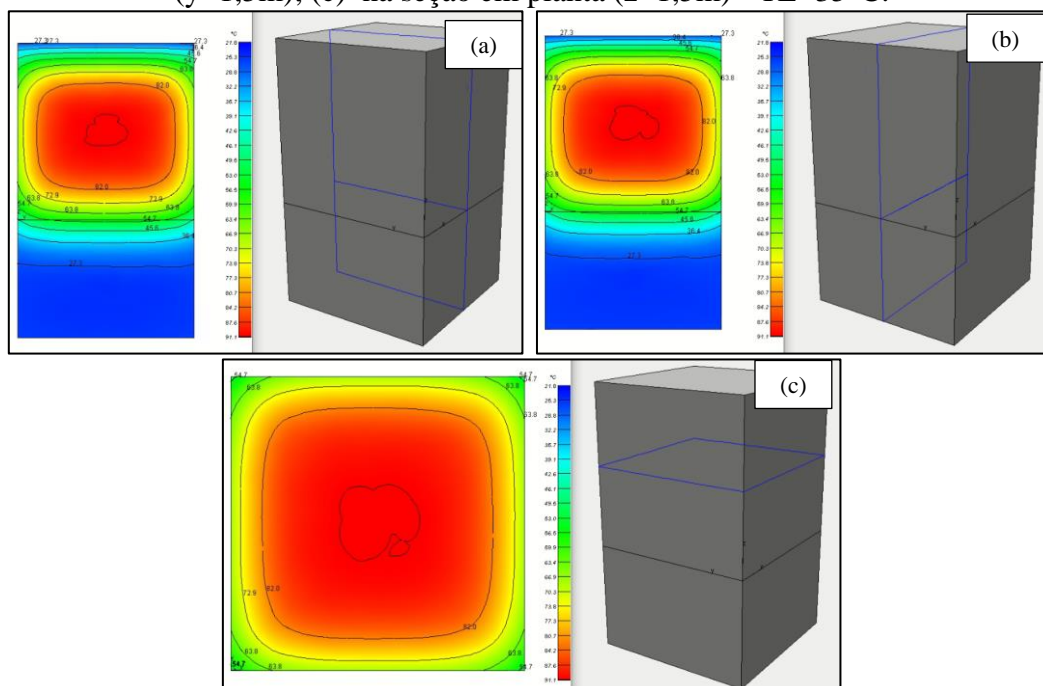
Características do concreto das estacas (restrição total)	Parâmetros
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	2500
Calor específico (kJ/kg.°C)	0,96
Condutividade térmica (kJ/m. h.°C)	9,0
Módulo de elasticidade (MPa)	30000
Coefficiente de dilatação térmica (10 <sup>-6</sup> /°C)	10,0
Coefficiente de Poisson	0,20

Fonte: Autor (2021).

Os dados meteorológicos foram adotados com base no banco de dados do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). Os dados foram coletados da estação A701 (São Paulo - Mirante) dos últimos 5 anos. Adotou-se nas simulações, temperatura ambiente constante de 26,5°C de acordo com a média das máximas diárias e velocidade do vento de 1,9 m/s de acordo com a velocidade do vento média diária.

As simulações foram feitas no *software* de elementos finitos b4cast versão 7.04, da empresa norueguesa ConTech Analysis ApS. Foram simuladas as evoluções de temperaturas e tensões que ocorreriam em um modelo tridimensional de elementos finitos, nas seções mais críticas das estruturas. São apresentadas na Figura 10 as isotermas do modelo utilizando o concreto C50 e geometria 3x3x3m.

Figura 10 – Isotermas do bloco 3x3x3m C50 a partir dos cálculos de temperaturas – 33 horas após o início do lançamento do concreto. (a) na seção transversal (x= 1,5 m); (b) na seção longitudinal (y=1,5m); (c) na seção em planta (z=1,5m) - TL=35°C.

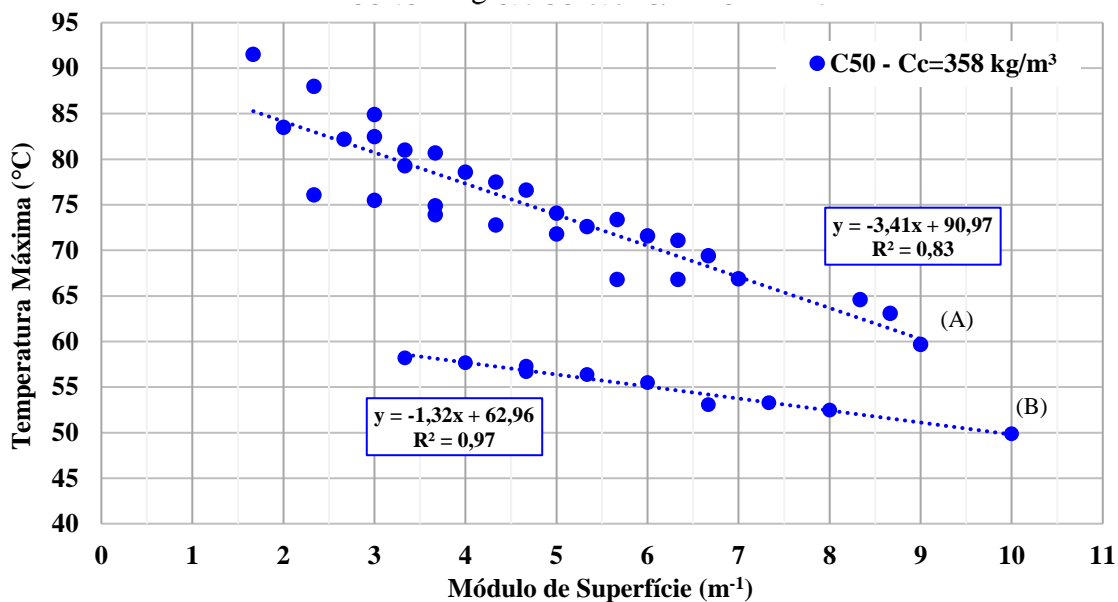


Fonte: Autor (2021).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram extraídos dos modelos os resultados de temperaturas e tensões principais máximas, independente de quando ocorreram. Apresenta-se na Figura 11 a correlação feita para as geometrias simuladas considerando a classe de concreto C50.

Figura 11 – Correlação entre módulo de superfície e temperatura máxima. Concreto C50  
 $C_c=358\text{kg/m}^3$  - CP II E 40.

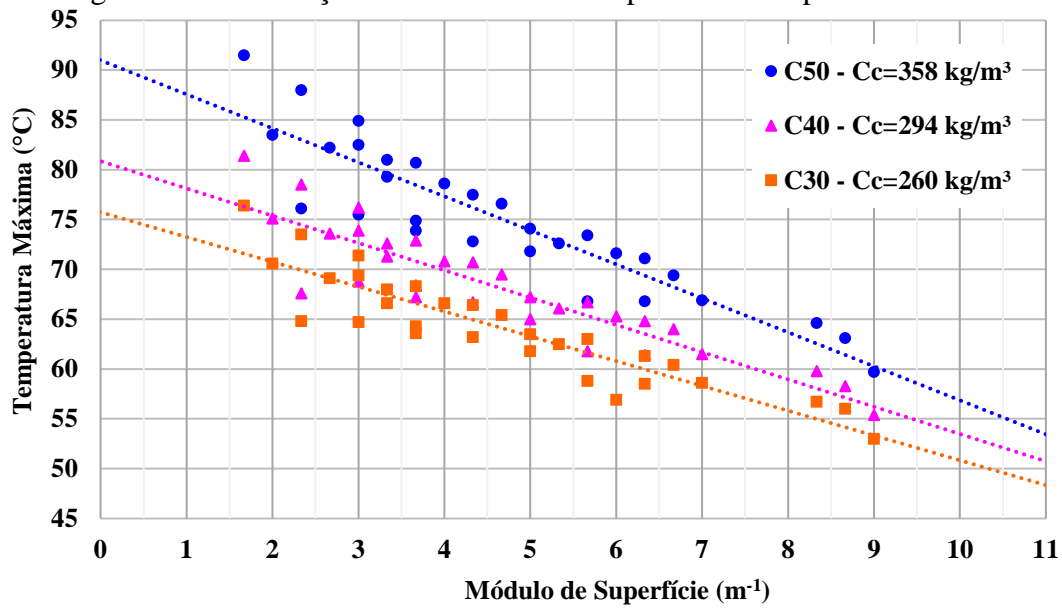


Fonte: Autor (2021).

Nota-se que os pontos se comportaram formando duas tendências distintas. A tendência B, é formada pelas geometrias que têm 0,5m na altura e a tendencia A pelas demais geometrias. Percebe-se também que nenhum ponto da tendência B ultrapassou ou 60°C e as tensões de origem térmica destas geometrias foram menores que  $10^{-2}$  MPa. Considerando que o C50 é o concreto estudado neste trabalho com maior elevação adiabática, excluiu-se estes pontos das demais tendências.

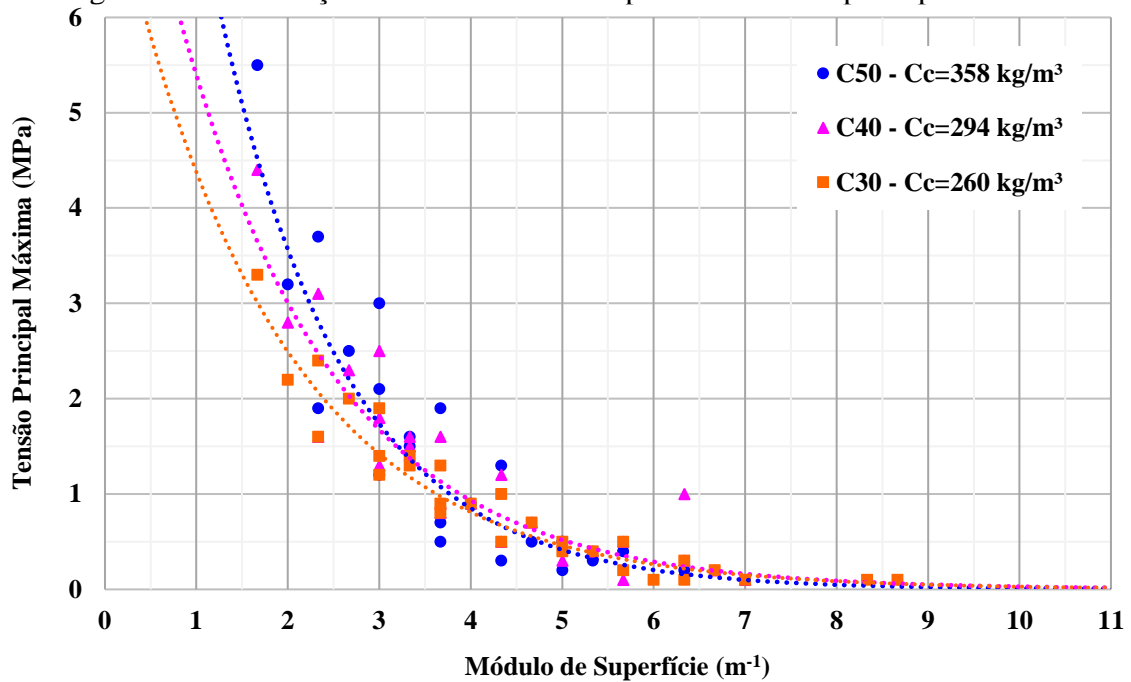
Apresenta-se na Figura 12 e na Figura 13, as correlações entre o módulo de superfície e a temperatura máxima, e tensão principal máxima, respectivamente, dos concretos C50, C40 e C30 e suas tendências, considerando o cimento CP II E 40.

Figura 12 – Correlações entre módulo de superfície e temperatura máxima.



Fonte: Autor (2021).

Figura 13 – Correlações entre módulo de superfície e tensão principal máxima.

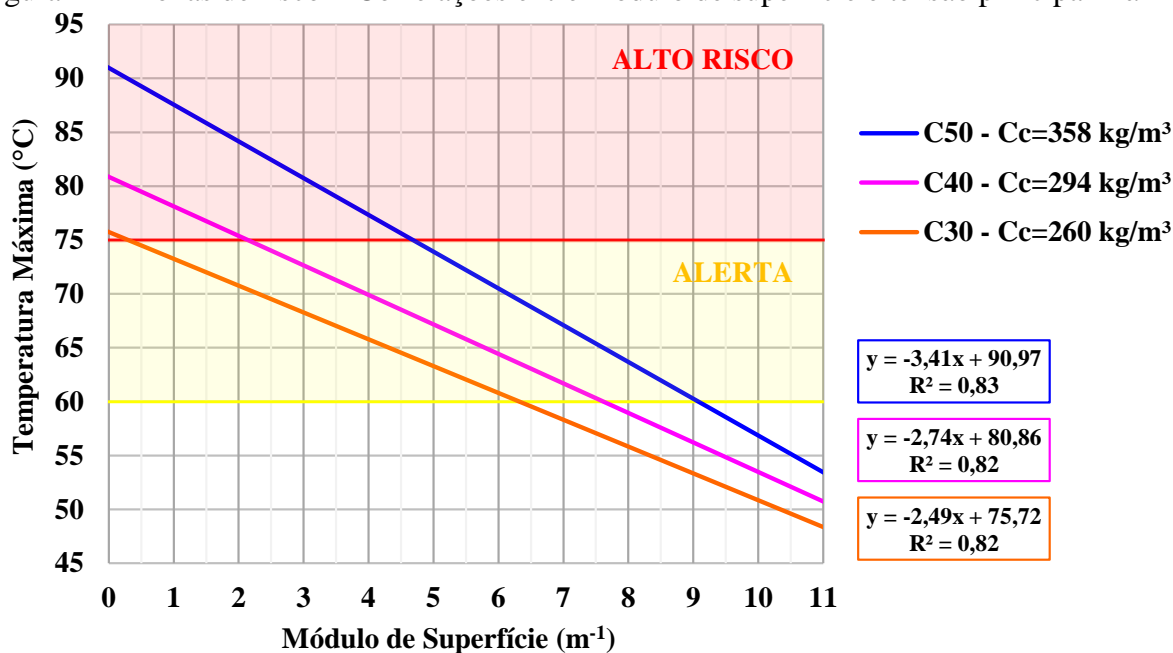


Fonte: Autor (2021).

Definiu-se então as áreas de risco para que as temperaturas máximas do concreto elevem o risco de DEF e as zonas de risco para que as tensões principais maiores de origem térmica superem a resistência a tração direta do concreto, sendo apresentadas na Figura 14.

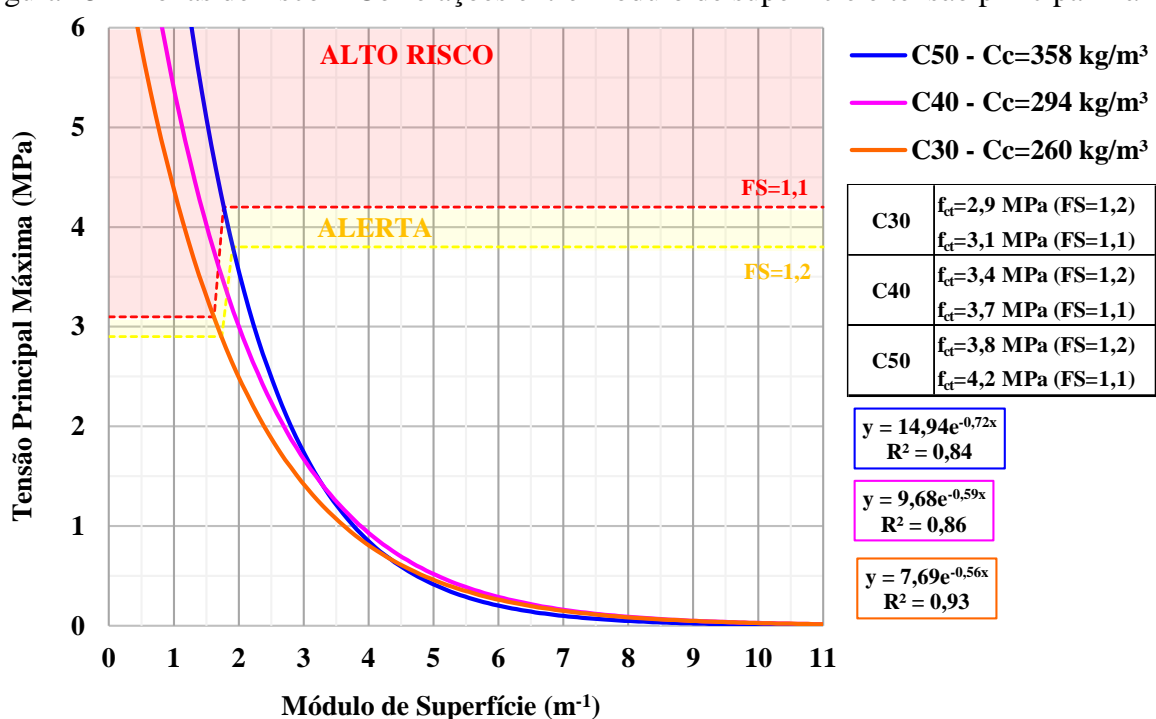


Figura 14 – Zonas de risco – Correlações entre módulo de superfície e tensão principal máxima.



Fonte: Autor (2021).

Figura 15 – Zonas de risco – Correlações entre módulo de superfície e tensão principal máxima.



Fonte: Autor (2021).

Comenta-se que a tendência observada nas tensões se assemelha com o conceito inicial do módulo de superfície, apresenta-o por Flaga (1990 *apud* Kanavaris *et. al.*, 2021), onde as estruturas são consideradas massivas quando o módulo de superfície é menor ou igual a 2m<sup>-1</sup>. Percebe-se ainda que nas tensões, a dosagem do concreto tem pouca influência, sendo estas mais influenciadas pela geometria, quando comparada ao gráfico das temperaturas.

Para a análise das temperaturas, definiu-se como zona de alto risco quando a temperatura for superior a 75°C. E a região entre 60°C e 75°C foi definida como zona de alerta. Para a análise das tensões, definiu-se como zona de alerta quando a tensão principal máxima for superior a resistência a tração direta do concreto, considerando fator de segurança (FS) de 1,2 e zona de alto risco quando a resistência a tração direta do concreto, considerando fator de segurança (FS) de 1,1. Os limites foram definidos considerando que nas simulações, a temperatura do concreto durante o lançamento foi de 35°C. Logo, com a redução desta temperatura, tanto a temperatura máxima quanto as tensões principais maiores serão reduzidas.

Sugere-se que a interpretação das zonas sigam as seguintes orientações:

- Zona de alto risco (vermelha): Deve-se avaliar a estrutura de modo individualizado, com os dados de dosagens reais e estimativas que se aproximem da realidade da obra para que se defina o zoneamento de temperaturas de lançamento, bem como estratégias a fim de minimizar os riscos de formação da DEF e ocorrência de fissuração térmica;
- Zona de alerta (amarela): O concreto deve ser lançado com temperatura de lançamento menor ou igual a 25°C. A pré ou pós refrigeração pode vir a ser usada. Deve-se ainda, monitorar a evolução da temperatura através de sensores instalados no interior da estrutura, durante 10 dias ou até que a temperatura interna se equilibre com a ambiente.

Devido à grande variação encontrada entre a geração de calor pelas reações de hidratação por diferentes tipos de cimentos Portland, bem como suas eficiências mecânicas em conjunto a outros materiais constituintes do traço, buscou-se em seguida unificar as curvas encontradas.

Verificou-se a correlação do módulo de superfície com a perda de calor para o ambiente em cada classe de concreto estudada e chegou-se em resultados estimados para a perda de calor de cada geometria, resultando em uma curva padrão, influenciada somente pela elevação adiabática (com as variáveis consumo de cimento e calor de hidratação).

Unificando as correlações realizadas, chegou-se na equação apresentada a seguir:

$$T = (-2,88 \times m_s + \Delta T + 33,2) \times 1,1 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (4)$$

Onde:

T = Temperatura máxima esperada (°C)

$m_s$  = Módulo de superfície ( $m^{-1}$ ) - Equação (2)

$\Delta T$  = Elevação adiabática (°C) - Equação (3)

Devido ao comportamento diferente de cada elevação adiabática do concreto, relacionado a perda de calor ao ambiente, percebeu-se que para os concretos com menor elevação adiabática, a

perda de calor ao ambiente foi subestimada, o que não leva à segurança. Para solucionar o problema, optou-se por majorar o resultado em 10%.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do trabalho realizado, pode-se concluir que:

- As estruturas de fundação com volumes a partir de  $1\text{m}^3$ , se submetidas a condições de alta geração de calor pelas reações de hidratação, como o caso do  $f_{ck}=50\text{ MPa}$ , podem ser consideradas estruturas de concreto massa;
- Os blocos de fundação com altura inferior a  $0,5\text{m}$  não apresentaram riscos térmicos na classe de concreto C50. Este risco deve ser reavaliado em condições de maior geração de calor ou condições de restrição maiores;
- A necessidade de precauções foi necessária a partir do módulo de superfície  $9,1\text{m}^{-1}$ ,  $7,6\text{m}^{-1}$  e  $3,6\text{m}^{-1}$  para as classes de concreto C50, C40 e C30 respectivamente;
- Para as geometrias simuladas, com maior área de  $9\text{m}^2$ , as tensões principais maiores foram pouco influenciadas pela dosagem do concreto, ao contrário das temperaturas máximas.

Através das análises realizadas, foi possível prever o grau de risco de uma estrutura poder ser considerada ou não em concreto massa. Recomenda-se que essa análise seja realizada ainda em fase de projeto a fim de alertar os construtores e/ou elaborar alternativas para minimizar o risco, como concretagem em etapas, zoneamento de  $f_{ck}$  e aumento da idade de controle para 63 dias.

## REFERÊNCIAS

- ACI COMMITTEE 207 (Estados Unidos). **Report on Thermal and Volume Change Effects on Cracking of Mass Concrete**. Farmington Hills: ACI, 2007.
- ACKER, P.; TORRENTI, J. M.; GUÉRINET, M. Controle da fissuração nas primeiras idades: condição de durabilidade das obras de concreto. In: OLLIVIER, Jean-Pierre *et al* (ed.). **Durabilidade do Concreto**. São Paulo: IBRACON, 2014. Cap. 6. p. 181-206.
- ANDRIOLO, Francisco Rodrigues; SKWARCZYNSKI, Tadeusz M. **Concreto pré-refrigerado no Brasil: uma evolução com mais de 20 anos**. Rio de Janeiro: Logos Engenharia, 1988.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. 3 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2015. 29 p.
- \_\_\_\_\_. **NBR 15577-1**: Agregados - reatividade álcali-agregado - Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- \_\_\_\_\_. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. 3 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. 256 p.
- BATTAGIN, Arnaldo Forti *et al*. Evolução da normalização, finura e resistência à compressão dos cimentos Portland brasileiros. **Concreto & Construções**, São Paulo, v. 73, n. 1, p. 39-51, mar. 2014. Trimestral.
- CONTECH ANALYSIS. **B4cast - Simulation of Hardening Concrete**. Disponível em: <http://www.b4cast.com/b4cast/b4cast.html>. Acesso em: 5 maio 2021.
- COUTO, Douglas de Andreza. **Considerações sobre a temperatura em elementos de fundação em concreto de grandes dimensões**. 2018. 144 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2018.
- FUNAHASHI JUNIOR, Eduardo I. *et al*. Práticas recomendadas para execução do bloco de fundação do edifício grande Ufficiale Evaristo Comolatti. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 60., 2018, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu: IBRACON, 2018. p. 1-16.
- FUNAHASHI JUNIOR, Eduardo I. *et al*. Simulação de tensões térmicas da sala de radioterapia do hospital das clínicas de Ribeirão Preto-SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 52., 2010, Fortaleza. **Anais [...]**. Fortaleza: IBRACON, 2010. v. 1, p. 1-16.

FUNAHASHI JUNIOR, Eduardo I. *et al.* Simulação de tensões térmicas do bloco de fundação do Edifício Paulista Corporate. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 53., 2011, Florianópolis. **Anais [...]**. Florianópolis: IBRACON, 2011. v. 1, p. 0-16.

FUNAHASHI, Eduardo *et al.* Refrigeração do concreto na construção da base da chaminé da Fábrica Eldorado Celulose. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 54., 2012, Maceió. **Anais [...]**. Maceió: IBRACON, 2012. v. 1, p. 0-16.

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. **Anais [...]**. Fortaleza: IBRACON, 2010. v. 1, p. 0-16.

GODART, Bruno. Pathology, Assessment and Treatment of Structures Affected by Delayed Ettringite Formation. **Structural Engineering International**, [S.L.], v. 27, n. 3, p. 362-369, ago. 2017. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.2749/101686617x14881932436771>.

HASPARYK, Nicole Pagan *et al.* Estudo de caso envolvendo ataque combinado de RAA e DEF em concreto de fundação de edificações. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 54., 2012, Maceió. **Anais [...]**. Maceió: IBRACON, 2012. v. 1, p. 1-16.

HOOVER Dam: The Story of Hoover Dam - Essays. The Story of Hoover Dam - Essays. 2015. Disponível em: <https://www.usbr.gov/lc/hooverdam/history/essays/concrete.html>. Acesso em: 4 maio 2021.

J. R. DE CARVALHO. Tecomat. **Cuidados na execução de fundações em concreto-massa: Edificações verticais**. Recife: Tecomat, 2020. 55 p.

KANAVARIS, Fragkoulis *et al.* Enhanced massivity index based on evidence from case studies: towards a robust pre-design assessment of early-age thermal cracking risk and practical recommendati. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 271, p. 121570, fev. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121570>.

KUPERMAN, Selmo Chapira; HASPARYK, Nicole Pagan. **Deterioração do Concreto por Reações Expansivas**. Salvador: CBDB, 2019.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto - Estrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MELO, Sandra Kurotus de. **Estudo da formação da etringita tardia em concreto por calor de hidratação do cimento**. 2010. 152 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geotecnia e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

SCHOVANZ, Dioice. **Estudo da formação da etringita tardia (DEF) em concretos com cimento portland pozolânico e de alta**. 2019. 163 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade Meridional - IMED, Passo Fundo, 2019.

SOUSA, Alex Lucena de; SILVA, Iago Rhuan Rocha da; CASTRO, Paulo Henrique Machado de. **Retração térmica e fissuração em concreto por calor de hidratação**. 2014. 108 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.

TAYLOR, H.F.W; FAMY, C; SCRIVENER, K.L. Delayed ettringite formation. **Cement And Concrete Research**, v. 31, n. 5, p. 683-693, maio 2001. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846\(01\)00466-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846(01)00466-5).

VICENTE, Grazielle Ribeiro *et al.* Como reduzir a probabilidade de fissuração de origem térmica e formação de etringita tardia em bases de aerogeradores de torres eólicas? In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 61., 2019, Fortaleza. **Anais [...]** . Fortaleza: IBRACON, 2019. v. 1, p. 0-16.

VICENTE, Grazielle Ribeiro *et al.* Fissuração de Origem Térmica em Blocos de Fundação: Quando Refrigerar o Concreto? In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 56., 2014, Natal. **Anais [...]** . Natal: IBRACON, 2014. p. 1-16.

### **AGRADECIMENTOS**

A todos os professores que tive o privilégio de ser aluno durante a formação.

À empresa Desek, em especial Selmo Kuperman, Eduardo Funahashi, Grazielle Vicente e Thomas Kuninari, pelos ensinamentos, ideias e motivações.

Aos colegas da Liga Acadêmica Mack Concreto, o qual devo o motivo da paixão pela área, incentivado pelos concursos estudantis promovidos pelo IBRACON.

À minha família e amigos, por serem o porto seguro em todos os momentos.