


Importância do controle da temperatura em elementos massivos de concreto armado

Prof. Tibério Andrade

1

Importância do controle da temperatura em elementos massivos de concreto armado

O cimento Portland libera calor na reação com a água



2

Importância do controle da temperatura em elementos massivos de concreto armado

Mas quanto de calor ?



3

Importância do controle da temperatura em elementos massivos de concreto armado

idade	Fabricante A CPII F 32		Fabricante B CPIV 32	
	Calor liberado (Kcal/kg) CPII F 32	% Calor liberado em relação aos 28 dias	CPIV 32	% Calor liberado em relação aos 28 dias
1 dia	71,2	87,4	50,2	78,4
1,7 dias	74,8	91,8	58,8	91,9
3 dias	75,3	92,4	60,2	94,0
5 dias	77,0	94,5	61,6	96,2
7 dias	79,1	97,0	62,1	97,0
28 dias*	81,5	100,0	64,0	100,0

$CH_{CPIV\ 32} = 64\% (1,4\text{dias})$
 $CH_{CPII\ F\ 32}$



4

Importância do controle da temperatura em elementos massivos de concreto armado

O que esse calor liberado pelo cimento representa em relação à elevação na temperatura do concreto?



5

Importância do controle da temperatura em elementos massivos de concreto armado

- Depende do calor gerado pelo cimento Portland
- Depende do consumo de cimento Portland no concreto
- Depende de quão adiabático é o regime durante a liberação do calor (massividade da elemento de concreto)



6

Importância do controle da temperatura em elementos massivos de concreto armado

Exemplo:

- Concreto com f_{ck} de 40MPa e classe de consistência S 100, bombeado, utilizando cimento Portland CII F 32 do fabricante A e aditivo plastificante.

INSUMOS	QUANTIDADES	
	kg	
	TUM	1m ³
Cimento CII F	1,00	448
Areia	1,47	659
Brita	2,47	1.107
Água	0,42	188
Aditivo	0,007	3,146
total	5,367	2405



7

Importância do controle da temperatura em elementos massivos de concreto armado

Exemplo 1:

Volume para 1kg de cimento
0,0022m³

Volume para 448kg de cimento
1m³

Qual a elevação da temperatura para cada um dos blocos ?



8

Importância do controle da temperatura em elementos massivos de concreto armado

Exemplo:

Estimativa da elevação da temperatura.

$$\Delta t_{ad} = \frac{QC_{cim} \cdot CH_{cim} f(t)}{M_{conc} \cdot \rho_{conc}}$$

Onde:

ΔT_{ad} é a elevação da temperatura (°C);

QC_{cim} é a quantidade de cimento (/m³);

$CH_{cim} f(t)$ é o calor de hidratação do cimento em função do tempo (Kcal/Kg);

\bar{m}_{conc} é a massa de concreto (Kg);

ρ_{conc} é o calor específico do concreto (0,270Kcal/Kg.°C);

Idade	Elevação da temperatura °C	
	Cubo 0,0022m ³	Cubo 1m ³
1 dia	49,1	49,1
1,7 dias	51,6	51,6
3 dias	52,0	52,0
5 dias	53,1	53,1
7 dias	54,6	54,6
28 dias	56,2	56,2



9

Importância do controle da temperatura em elementos massivos de concreto armado

- Os valores obtidos de elevação da temperatura se referem a um regime adiabático, isto é, onde não existe troca de calor para o ambiente;
- Quanto maior a massividade do elemento, mais próximo o regime se aproxima do adiabático nas primeiras horas, quando a taxa é intensa, e mais alta será a temperatura atingida;

$$\text{Calor}_{\text{acumulado}} (t) = \text{Calor}_{\text{gerado}} (t) - \text{Calor}_{\text{dissipado}} (t)$$

- Elementos de concreto, cuja a menor dimensão seja igual ou superior a 0,70m, já podem ser considerados massivos, existindo a dificuldade de dissipação de calor nas primeiras horas, quando a taxa de liberação de calor pelo cimento é muito intensa;



10

Importância do controle da temperatura em elementos massivos de concreto armado

E a temperatura de lançamento tem influencia ?



11

Importância do controle da temperatura em elementos massivos de concreto armado

Recife:
TL \approx 35°C

Florianópolis no inverno
TL \approx 20°C

Idade	Elevação da temperatura °C	
	Recife	Florianópolis
1 dia	84,1	69,1
1,7 dias	86,6	71,6
3 dias	87,0	72,0
5 dias	88,1	73,1
7 dias	89,6	74,6
28 dias	91,2	76,2



12

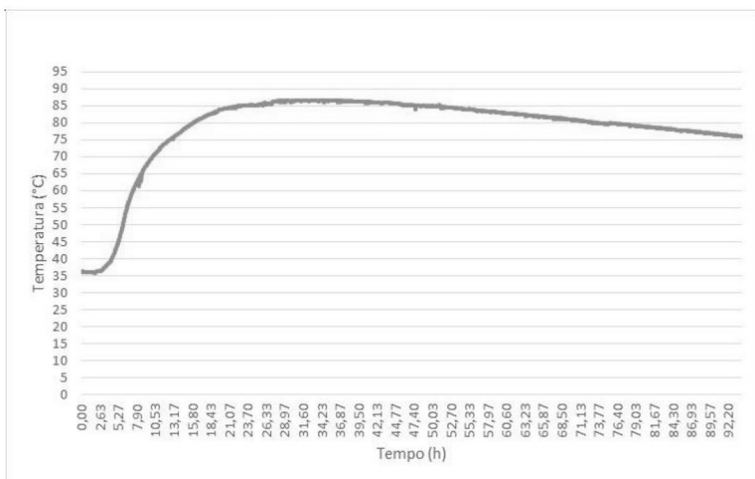
Importância do controle da temperatura em elementos massivos de concreto armado

Então qual o comportamento real da evolução da temperatura de um elemento massivo de concreto ?



13

Importância do controle da temperatura em elementos massivos de concreto armado



$f_{ck} = 40\text{MPa}$
Consumo de cimento de 470kg/m³
Dimensão : 3,40 x 3,40 x 1,80
Volume: 20,8m³
CP IV 32



14

Importância do controle da temperatura em elementos massivos de concreto armado

Quais as implicações de um aquecimento nos elementos massivos de concreto ?



15

Importância do controle da temperatura em elementos massivos de concreto armado

- Fissuração devido à movimentação térmica
- Expansão interna e fissuração do concreto, ao longo do tempo, devido ao mecanismo de Formação de Etringita Tardia (DEF)



16

Importância do controle da temperatura em elementos massivos de concreto armado

E a DEF ?

Quando foi descoberta ?

O que é etringita tardia?

Quais fatores de risco?

Como preveni-la ?



17

Importância do controle da temperatura em elementos massivos de concreto armado

Primeiro caso diagnosticado: 1987

Dormentes de concreto da Finlândia (cura térmica)

(TEPPONEN e ERIKSSON, 1987)

Outros países com dormentes de concreto:

Alemanha: (HEINZ et al., 1989)

Checoslováquia: (VITOUVA, 1991)

Austrália: (SHAYAN e QUICK, 1992)

África do Sul: (OBERHOLSTER et al., 1992)

EUA: (MIELENZ et al., 1995)

Suécia: (SAHU e THAULOW, 2004)



18

Importância do controle da temperatura em elementos massivos de concreto armado



- Cura térmica
- Umidade essencial
- Os sintomas surgiram com menos de 10 anos



19

Importância do controle da temperatura em elementos massivos de concreto armado

Outros casos em peças pré fabricadas

Escadas de estacionamento de um estacionamento nos EUA
(HIME, 1996)

Vigas protendidas e sarjetas na Inglaterra
(HOBBS, 2001)

Arquibancadas de um estádio nos EUA
(OZOL e STRAND, 2000)

Telhas de fibro-cimento na Itália
(COLLEPARDI, 1999)



20

Importância do controle da temperatura em elementos massivos de concreto armado

Casos de elementos massivos no mundo:

Fundações de torres de linhas de transmissão nos EUA com 3 a 8 anos após a concretagem desses elementos

(HIME, 1996; LAWRENCE et al., 1999)

Na Grã-Bretanha, uma campanha revelou mais de 23 casos de elementos de pontes afetados pela DEF em fundações, vigas, pilares (HOBBS, 2001).

8 e 20 anos após a construção.

- Concretos foram mais frequentemente lançados durante o verão,
- Possuíam elevado consumo de cimento (entre 420 e 550 kg/m³),
- alto teor de alcális equivalente (> 4,0 kg/m³).
- A tendência dos elementos estruturais serem bastante espessos (pelo menos 60 cm) temperatura máxima atingida no interior destes era estimada em cerca de 80°C.

21

Importância do controle da temperatura em elementos massivos de concreto armado

Casos de França (GODART e DIVET, 2013):

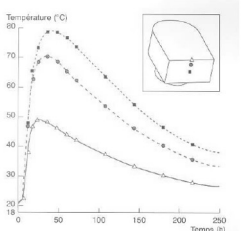
A ponte Ondes, localizada perto de Toulouse, foi concluída e inaugurada em 1955.

- A altura média dos pilares de 6,8 m e diâmetro de 2 m. As vigas travessas medem 1,5m de altura, 8,2 m de comprimento e 2,7m de largura.
- Primeiros danos relatados em 1980, sendo mencionadas fissuras mapeadas de até 7 mm.
- Consumo especificado de 350 kg/m³ de cimento Portland comum (CEM I – equivalente no Brasil ao CP-I), sendo que o consumo efetivamente utilizado, foi de 430 kg/m³ e relação a/c de 0,5.
- Uma simulação numérica - cerca de 80°C, permanecendo acima de 70°C durante cerca de 70 horas.
- Em 1995, foi realizada uma reparação na viga travessa, a qual foi feita injeção das fissuras e protegidas com revestimento superficial.
- No entanto, em 1998 foi confirmada a evolução do fenômeno, com ocorrência de novo quadro fissuratório e deformações globais.
- Tal acontecimento comprova a dificuldade de implementar soluções de reparo para este tipo de manifestação patológica, justificando o alto grau de importância de prevenir-se a DEF durante a construção.

22

Importância do controle da temperatura em elementos massivos de concreto armado

Ponte Ondes (GODART e DIVET, 2013):



23

Importância do controle da temperatura em elementos massivos de concreto armado

Casos de França (GODART e DIVET, 2013):

A ponte estaiada de Bourgogne

- Construída durante os anos de 1989-1992. Pilares com 46 m de altura e o tabuleiro é feito em concreto protendido. Parte inferior dos pilares composta por um “pé”, uma base e duas “pernas”. As dimensões, respectivamente, são para o “pé”: 15,20 x 6 x 2, para a base: 11,90 x 3 x 6,5, e para as “pernas”: 2,20 x 3 x 6.
- Os “pés” dos pilares estão sempre imersos, as bases estão parcialmente imersas em água e as pernas estão sempre acima do nível da água do rio.
- As partes imersas da base dos pilares foram afetadas por um processo de fissuração multidirecional, assim como nas partes em contato com o ar. Uma elevada densidade de fissuração foi observada no meio das faces da base, com abertura de até 1 cm. Já as faces laterais das “pernas” dos pilares apresentaram algumas fissuras horizontais, com espessuras que variavam entre 0,2 e 0,4 mm.
- Os concretos com consumo de 400 kg/m³ de cimento Portland comum (CEM I 52.5 tipo N) e relação a/c de 0,45. Através de modelagem, o concreto atingiu 79°C no “pé” e na base do pilar e 71°C nas “pernas”. Na base, a temperatura permaneceu acima de 70°C durante 6 dias, enquanto que no “pé” permaneceu acima de 70°C durante 3 dias.

24

Importância do controle da temperatura em elementos massivos de concreto armado



25

Importância do controle da temperatura em elementos massivos de concreto armado

Casos de França (GODART e DIVET, 2013):

A ponte Bellevue:

- Construída entre os anos de 1988 e 1989 e possui seis vãos, que totalizam o comprimento de 385 m apoiados em sete pilares com 6,3 m de comprimento por 3,0 m de largura.
- As fissuras mapeadas ocorreram nas regiões dos pilares susceptíveis às ações da maré. Os danos ocorridos nos pilares foram atribuídos a reação de expansão interna, porém, esta fissuração foi observada imediatamente após a construção e atribuída a retração térmica do concreto.
- O concreto foi produzido com um consumo de 380 kg/m³ de cimento Portland composto, com cerca de 10% de filler calcário (CEM II – Tipo A), relação a/c de 0,54 e agregados predominantemente silicosos e silicatos.
- A evolução da temperatura no interior do concreto foi calculada pelo método simplificado, apresentado no guia LCPC (LCPC, 2009), com a hipótese de que a temperatura do concreto fresco no momento do lançamento era igual a 20°C. A temperatura máxima no núcleo do pilar foi estimada em 75 °C.

26

Importância do controle da temperatura em elementos massivos de concreto armado



27

Importância do controle da temperatura em elementos massivos de concreto armado

Sul do Sri Lanka,

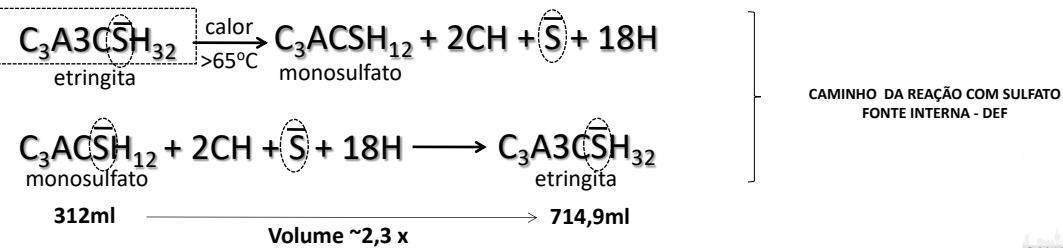
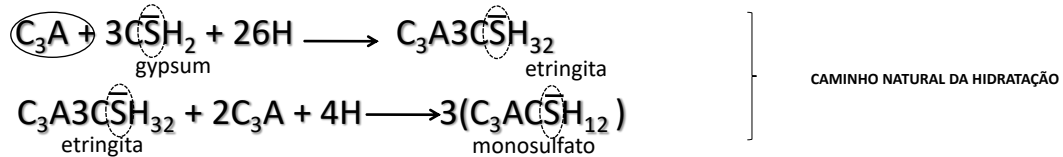
Blocos de pilares de uma ponte de rodovia.

Após extensas investigações, foi verificada que a causa principal para a fissuração nestes blocos era atribuída à DEF (NANAYAKKARA, 2011).



28

Importância do controle da temperatura em elementos massivos de concreto armado



29

Importância do controle da temperatura em elementos massivos de concreto armado

Fatores de risco

Fatores		
Cimento	Composição química DIAMOND et. al, 2002	DEF _{index} = (SO ₃ /Al ₂ O ₃) _{molar} · [(SO ₃ + C ₃ A) _w /10] · (Na ₂ O _{eq}) ^{1/2} DEF _{index} < 1,1
	Finura	A probabilidade aumenta com a finura
Umidade		Essencial
Temperatura interna		Acima de 65°C
		Tempo de permanência acima de 65°C



30

Importância do controle da temperatura em elementos massivos de concreto armado

Como prevenir:

Guia de prevenção proposto pelo LCPD (LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES)

- Análise de risco e adoção de medidas preventivas para cada classe de risco;
 - Variáveis de risco:
 - Categoria estrutural, que depende do tipo de estrutura, da sua finalidade, das consequências das alterações no nível desejado de segurança, e por último, de sua manutenção futura (Categoria 1,2 e 3);
 - Grau de exposição do elemento estrutural, o guia define três classes de exposição: XH1, XH2 e XH3. Estas classes levam em consideração o fato de que a presença de água ou umidade elevada constituem um fator essencial para o desenvolvimento da formação de etringita tardia



31

Importância do controle da temperatura em elementos massivos de concreto armado

Categoria	Exemplos de estruturas ou elementos estruturais
Categoria I (pequenas ou aceitáveis consequências)	Estruturas feitas em concreto de classe de resistência inferior a C16/20 Componentes de construção que não suportam carga Elementos facilmente substituídos Estruturas temporárias A maioria dos produtos pré-fabricados não-estruturais
Categoria II (consequências bastante graves)	Os componentes de suporte de carga da maioria dos edifícios e estruturas de engenharia (incluindo pontes comuns) A maioria dos produtos estruturais pré-fabricados (incluindo tubos pressurizados)
Categoria III (consequências inaceitáveis ou quase inaceitáveis)	Reatores de usinas nucleares e torres de resfriamento Barragens Túneis Pontes e viadutos excepcionais Monumentos e edificações de referência Dormentes para vias férreas

32

Importância do controle da temperatura em elementos massivos de concreto armado

Designação da classe de exposição	Descrição do ambiente	Exemplos informativos para ilustrar a escolha da classe de risco
XH1	Seco ou umidade moderada	Parte de uma estrutura de concreto localizada no interior da edificação, onde a taxa de umidade do ar do ambiente é baixa ou média Parte de uma estrutura de concreto localizada no exterior e protegida da chuva
XH2	Alternância de umidade e secagem, alta taxa de umidade	Parte de uma estrutura de concreto localizada no interior da edificação, onde a taxa de umidade do ar do ambiente é elevada Parte de uma estrutura de concreto sem proteção de um revestimento e exposto às intempéries, sem estagnação de água na superfície Parte de uma estrutura de concreto sem proteção de um revestimento e frequentemente sujeita à condensação
XH3	Em contato duradouro com água: estado de imersão permanente, estagnação de água na superfície, zona de marés	Parte de uma estrutura de concreto permanentemente submersa em água Elementos estruturais marítimos Um grande número de fundações Parte de uma estrutura de concreto regularmente exposta à projeções de água

33

Importância do controle da temperatura em elementos massivos de concreto armado

Escolha do nível de prevenção

Classe de exposição da estrutura	XH1	XH2	XH3
Categoria I	As	As	As
Categoria II	As	Bs	Cs
Categoria III	As	Cs	Ds

34

Importância do controle da temperatura em elementos massivos de concreto armado

Nível de prevenção As ($T_{\max} < 85^{\circ}\text{C}$)

Para este nível de prevenção, o risco relativo à DEF é afastado tomando-se a seguinte medida preventiva:

- A temperatura T_{\max} capaz de ser atingida no interior da estrutura deve permanecer abaixo de 85°C .
- No caso de tratamento térmico realizado em elementos pré-fabricados é permitido que a temperatura exceda a $T_{\max} = 85^{\circ}\text{C}$ até o valor de 90°C , desde que o período durante o qual a temperatura permaneça acima de 85°C seja limitado a 4 horas.



35

Importância do controle da temperatura em elementos massivos de concreto armado

Nível de prevenção Bs ($T_{\max} < 75^{\circ}\text{C}$)

Para este nível de prevenção, o risco relativo à DEF é afastado tomando-se uma das seguintes medidas preventivas:

- A temperatura máxima atingida no interior do concreto deve ser mantida abaixo de 75°C .
- No entanto, se a temperatura máxima obtida no interior do concreto não é capaz de se manter abaixo de 75°C , então ela nunca deve ultrapassar 85°C e pelo menos uma das seis condições mostradas na tabela 7 devem ser satisfeitas.



36

Importância do controle da temperatura em elementos massivos de concreto armado

- **Nível de prevenção Cs ($T_{\max} < 70^{\circ}\text{C}$)**

Para este nível de prevenção, o risco relativo à DEF é afastado tomando-se uma das seguintes medidas preventivas:

- A temperatura máxima atingida no interior do concreto deve ser mantida abaixo de 70°C .
- No entanto, se a temperatura máxima obtida no interior do concreto não é capaz de se manter abaixo de 70°C , então ela nunca deve ultrapassar 80°C e pelo menos uma das seis condições mostradas na tabela 7 devem ser satisfeitas.



37

Importância do controle da temperatura em elementos massivos de concreto armado

Nível de prevenção Ds

Para este nível de prevenção, o risco relativo à DEF é afastado tomando-se uma das seguintes medidas preventivas, sendo a primeira prioritária:

- A temperatura máxima atingida no interior do concreto deve ser mantida abaixo de 65°C .
- Se a temperatura máxima obtida no interior do concreto não é capaz de se manter abaixo de 65°C , então ela nunca deve ultrapassar 75°C com o cumprimento das seguintes condições:
 - Atender a condição 2 da tabela 7;
 - Validação do concreto por um laboratório independente especialista em DEF.



38

Importância do controle da temperatura em elementos massivos de concreto armado

Condição I	Condição II	Condição III
<p>1) Duração da manutenção da temperatura do concreto acima de 75°C < 4 horas para Bs e acima de 70°C < 4h para Cs;</p> <p>2) Teor equivalente de álcalis do concreto < 3 kg/m³</p>	<p>Utilização de cimentos de classe RS, com:</p> <p>a) <u>para concreto pré-fabricado</u>: No caso da utilização de cimentos CP I; CP I S; CP V ARI e CP II F: Teor equivalente de álcalis do concreto < 3 kg/m³.</p> <p>b) <u>para concreto moldado in-loco</u>: CP I; CP I S; CP V ARI e CP II F não são aceitos.</p>	<p>1) Uso de cimentos do tipo CP III ou CP IV;</p> <p>2) SO₃ do cimento < 3% e C₃A do clínquer < 8%</p>
Condição IV	Condição V	Condição VI
<p>1) Uso de cinza volante, escória de alto-forno, pozolanas naturais calcinadas ou metacaulim em combinação com um CEM I;</p> <p>2) Teor de adições > 20%;</p> <p>3) SO₃ do cimento < 3% e C₃A do clínquer < 8%</p>	<p>Verificação da durabilidade do concreto com relação à DEF baseada em testes de desempenho e que satisfaçam uma série de critérios de decisão.</p>	<p>Para elementos pré-fabricados, o par concreto/aquecimento é idêntico ou semelhante a um par concreto/aquecimento que possui ao menos 5 referências de uso sem nenhum problema</p>



39

Importância do controle da temperatura em elementos massivos de concreto armado

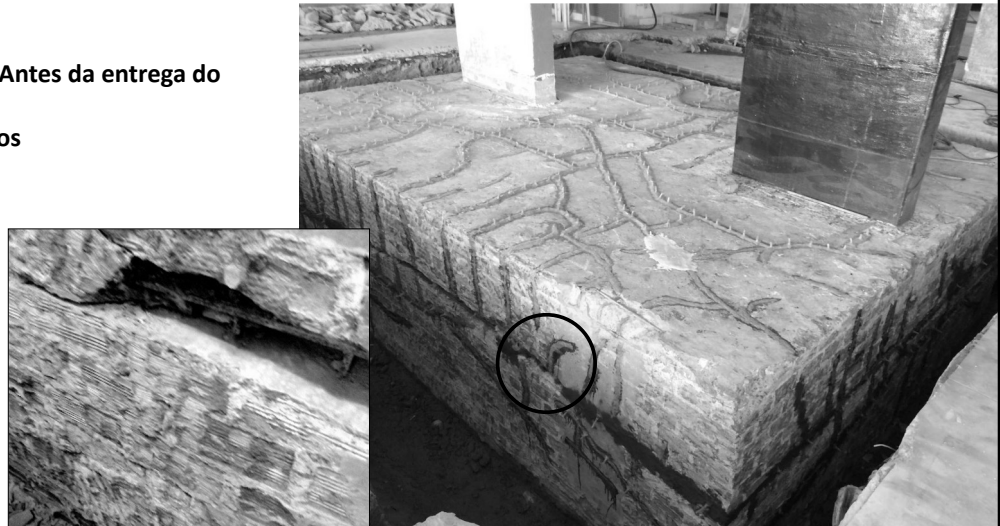
E esse problema nos diz respeito?



40

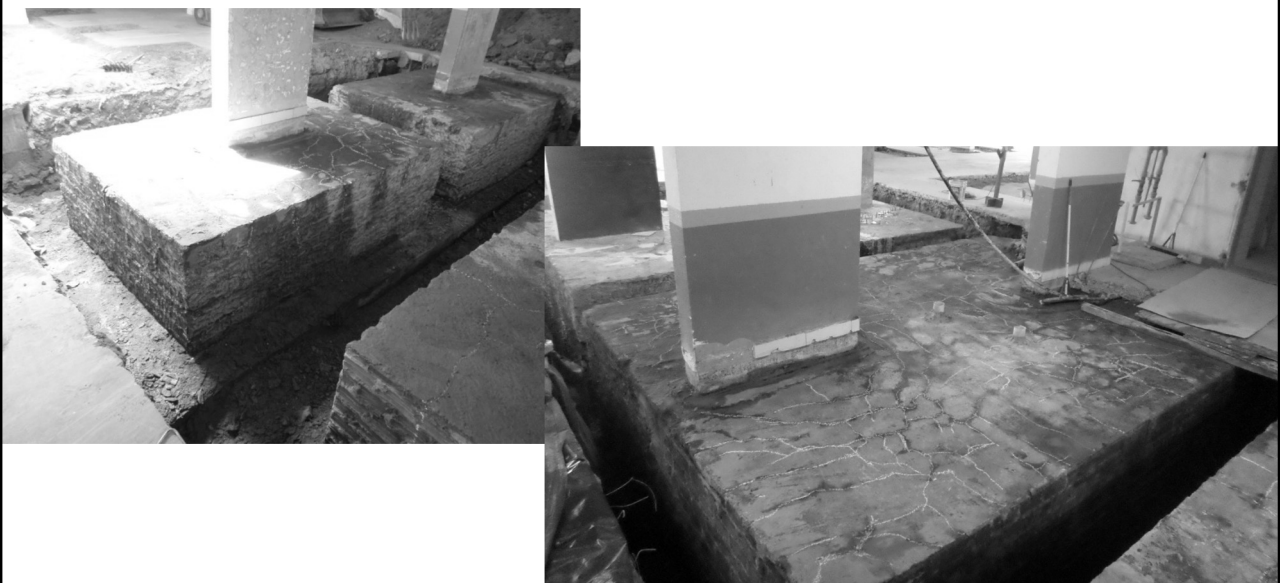
Importância do controle da temperatura em elementos massivos de concreto armado

**Edif. Comercial:
35 lajes
Diagnosticado 2014 (Antes da entrega do imóvel)
Idade na época: 2 anos**



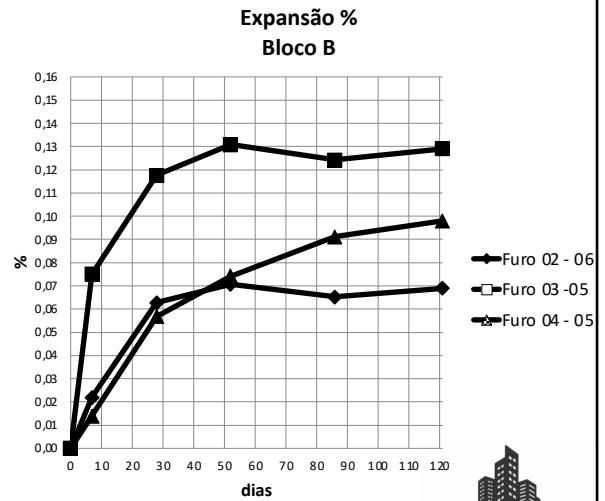
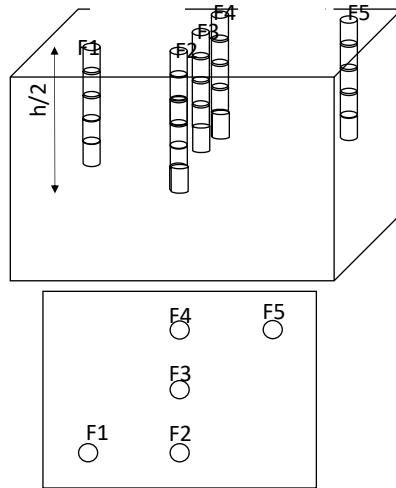
41

Importância do controle da temperatura em elementos massivos de concreto armado



42

Importância do controle da temperatura em elementos massivos de concreto armado



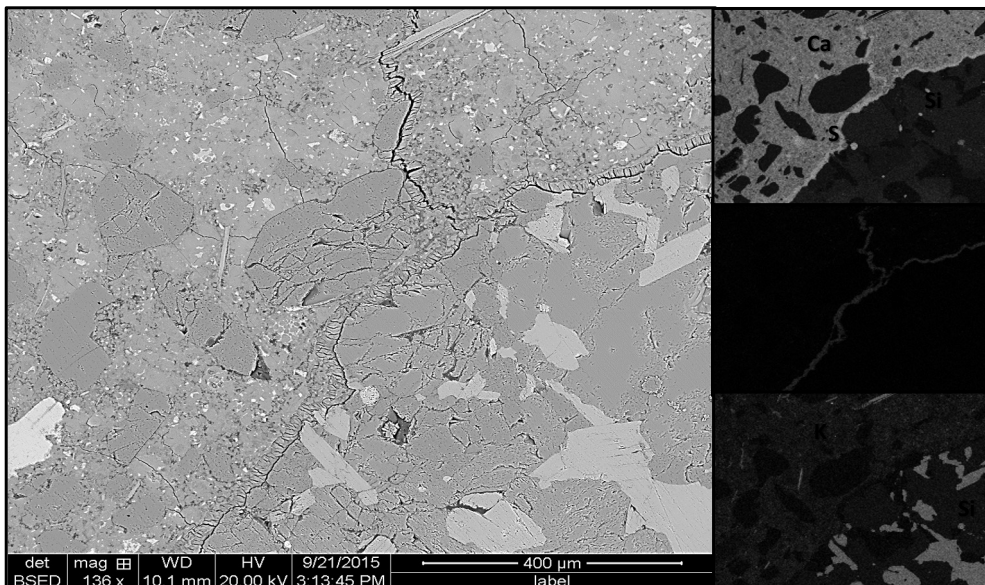
FONTE: TECOMAT/GRUPO DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS-UFPB



43

Importância do controle da temperatura em elementos massivos de concreto armado

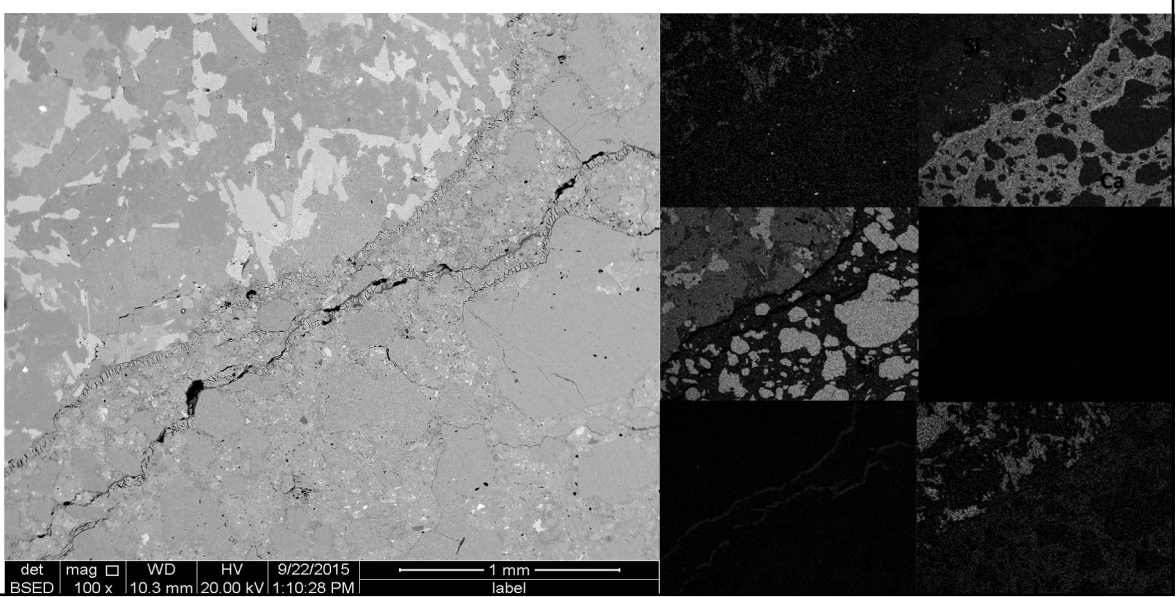
FONTE: TECOMAT/GRUPO DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS-UFPB



44

Importância do controle da temperatura em elementos massivos de concreto armado

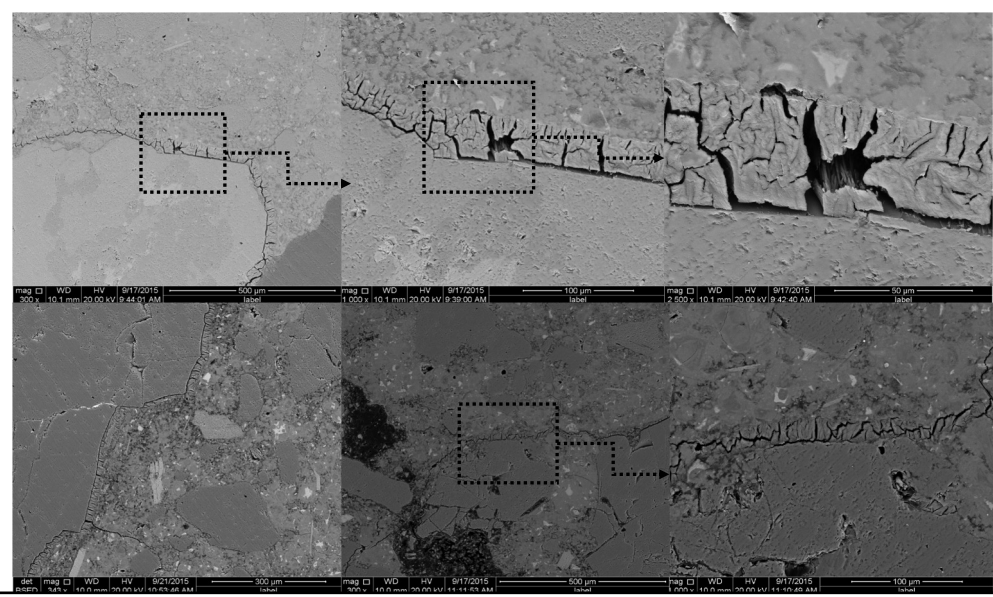
FONTE: TECOMAT/GRUPO DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS-UFPB



45

Importância do controle da temperatura em elementos massivos de concreto armado

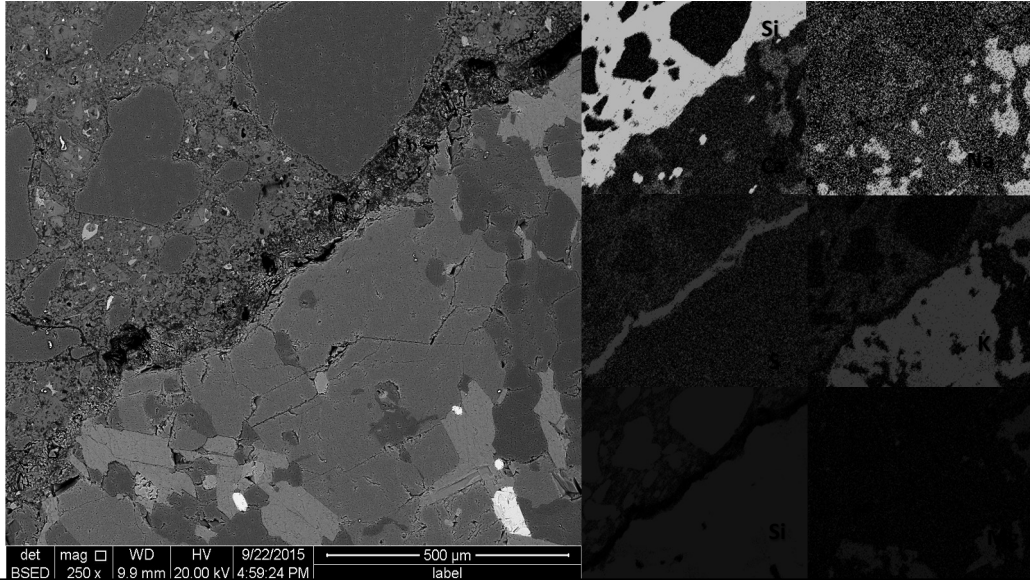
FONTE: TECOMAT/GRUPO DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS-UFPB



46

Importância do controle da temperatura em elementos massivos de concreto armado

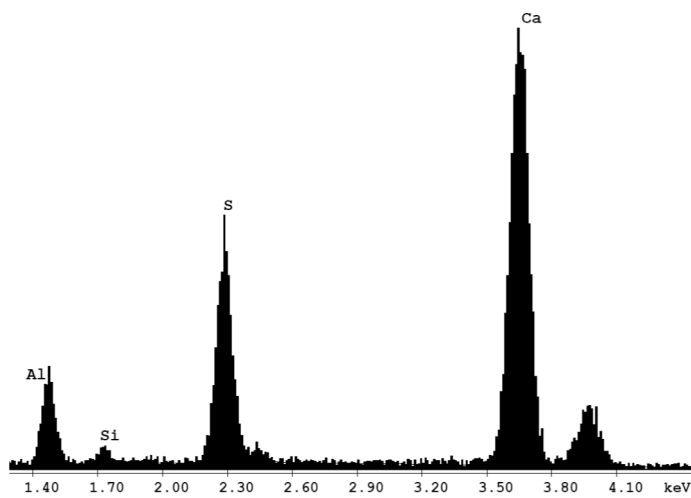
FONTE: TECOMAT/GRUPO DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS-UFPB



47

Importância do controle da temperatura em elementos massivos de concreto armado

FONTE: TECOMAT/GRUPO DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS-UFPB



EDS:
 Presença de Ca, S e Al
 Proporção molar estequiométrica:
 $Ca/S = 2$
 $Ca/Al = 6$
 Diagnóstico: Etringita preenchendo microfissuras na matriz, na interface matriz/agregado e poros.



QXMA: Futuros estudos



48

Importância do controle da temperatura em elementos massivos de concreto armado

O que fazer para manter a temperatura abaixo do limite ?

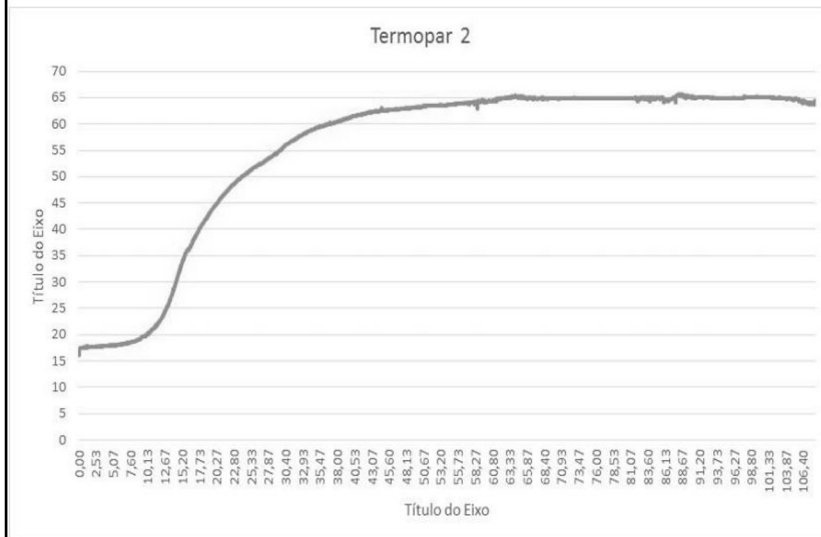



49

Importância do controle da temperatura em elementos massivos de concreto armado	
AÇÕES PARA CONTROLE DA TEMPERATURA	
<ul style="list-style-type: none"> Quando possível, redução dos f_{ck}'s de projeto para os elementos massivos de fundações Necessidade dos projetistas de especificarem a temperatura máxima nos elementos massivos da fundação 	<p>Controle da temperatura</p>
<ul style="list-style-type: none"> Limitar o consumo de cimento máximo com o auxílio de adições minerais e o emprego da combinação de aditivos polifuncionais e superplastificantes 	
<ul style="list-style-type: none"> Resfriamento do concreto com o emprego de gelo, nitrogênio líquido e/ou concretagem em camadas 	
<ul style="list-style-type: none"> Monitoramento da temperatura 	

50

Importância do controle da temperatura em elementos massivos de concreto armado



$f_{ck} = 40\text{MPa}$

Dimensões: 12,15 x 9,30 x 3,30) m

Volume: 373m³

Cimento: CPII F 40

Consumo de cimento: 280kg/m³

Consumo de sílica ativa: 38kg/m³

a/c = 0,58

Gelo: 140kg/m³

Temp. Lanç.: 17°C



51

Importância do controle da temperatura em elementos massivos de concreto armado

PROPOSTA MAIS AMPLA PARA ELABORAÇÃO DE UMA
NORMA ESPECÍFICA QUE TRATE DAS:

**“ESPECIFICAÇÕES E PROCEDIMENTOS EXECUTIVOS PARA
ELEMENTOS MASSIVOS DE FUNDAÇÃO”**



52

Importância do controle da temperatura em elementos massivos de concreto armado

OBRIGADO !!!!!!!

