Aspectos Fundamentais na Análise de Problemas de Patologias Construtivas: ocorrência de *DEF* em fundações

Prof. Dr. Eduardo Cabral
Universidade Federal do Ceará - UFC
Grupo de Pesquisa em Materiais de Construção e Estruturas - GPMATE

GPMATE
Grupo de Pesquisa em Materiais de Construção e Estruturas

Instituto Brasileiro de Avaliações e Perícias de Engenharia – IBAPE CE
Seminário Nacional de Perícias de Engenharia

Introdução

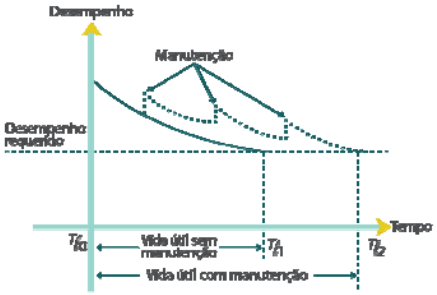
Durante muito tempo, o concreto chegou a ser considerado um material praticamente eterno, de durabilidade "ilimitada". Tanto é que, até o final de década de 1990, muitas normas e regulamentos referentes ao projeto e execução de estruturas de concreto, nas mais diferentes regiões do mundo, haviam sido concebidas com a preocupação dominante de garantir a obtenção da mais adequada resistência mecânica para as diversas peças estruturais (SOUZA e RIPPER, 1998).

Introdução

• Durabilidade

É a capacidade do concreto de cimento Portland resistir à ação de intempéries, ataque químico, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração.

ACI, 2001



Instituto Brasileiro de Avaliações e Perícias de Engenharia – IBAPE CE
Seminário Nacional de Perícias de Engenharia

Introdução

• Classificação das causas da deterioração do concreto

Físicas

Químicas

Mehta e Monteiro, 2008

Aspectos fundamentais na análise de problemas de patologias construtivas: ocorrência de *DEF* em fundações Prof. Eduardo Cabral (UFC)

Introdução

• Classificação das causas da deterioração do concreto

Mehta e Monteiro, 2008

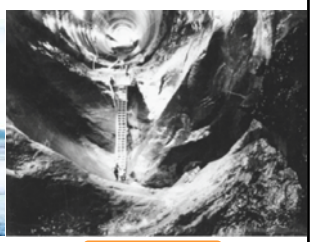
Instituto Brasileiro de Avaliações e Perícias de Engenharia – IBAPE CE
Seminário Nacional de Perícias de Engenharia

Introdução

• Classificação das causas da deterioração do concreto

Abrasão

Erosão



Cavitação

Mehta e Monteiro, 2008

Aspectos fundamentais na análise de problemas de patologias construtivas: ocorrência de *DEF* em fundações Prof. Eduardo Cabral (UFC)

Introdução

• Classificação das causas da deterioração do concreto

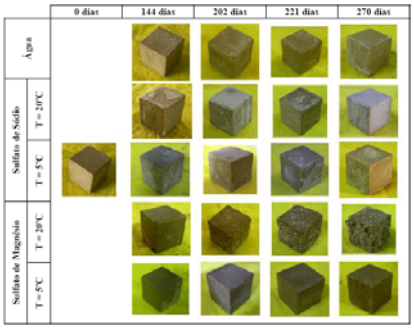
- Físicas
  - Desgaste Superficial
    - Abrasão
    - Erosão
    - Cavitação
  - Fissuração
    - Δ Volume (ΔT, ΔU, sais)
    - Sobrecargas, impactos, c. cíclicas
    - Extremos de temperatura

Mehta e Monteiro, 2008

Instituto Brasileiro de Avaliações e Perícias de Engenharia – IBAPE CE
Seminário Nacional de Perícias de Engenharia

Introdução

• Classificação das causas da deterioração do concreto



Δ Volume (ΔT, ΔU, sais)

Extremos de temperatura

Mehta e Monteiro, 2008

Introdução

• Classificação das causas da deterioração do concreto

Sobrecargas, impactos, cargas cíclicas

Instituto Brasileiro de Avaliações e Perícias de Engenharia – IBAPE CE
Seminário Nacional de Perícias de Engenharia

Introdução

• Classificação das causas da deterioração do concreto

Químicas → Hidrólise dos componentes da pasta de cimento → Eflorescências

Mehta e Monteiro, 2008

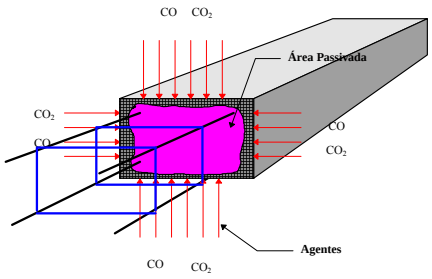
Introdução

• Classificação das causas da deterioração do concreto

- Químicas
  - Hidrólise dos componentes da pasta de cimento → Eflorescências
  - Reações de troca catiônica → Carbonatação

$$CO_2 + Ca(OH)_2 \xrightarrow{H_2O} CaCO_3 + H_2O$$

$$CO_2 + 2Na, KOH \xrightarrow{H_2O} Na_2, K_2CO_3 + H_2O$$



Mehta e Monteiro, 2008

Instituto Brasileiro de Avaliações e Perícias de Engenharia – IBAPE CE
Seminário Nacional de Perícias de Engenharia

Introdução

• Classificação das causas da deterioração do concreto

- Químicas
  - Hidrólise dos componentes da pasta de cimento → Eflorescências
  - Reações de troca catiônica → Carbonatação
  - Reações formando produtos expansivos → Hidratação tardia da cal livre

Mehta e Monteiro, 2008

Aspectos fundamentais na análise de problemas de patologias construtivas: ocorrência de *DEF* em fundações Prof. Eduardo Cabral (UFC)

Introdução

• Classificação das causas da deterioração do concreto

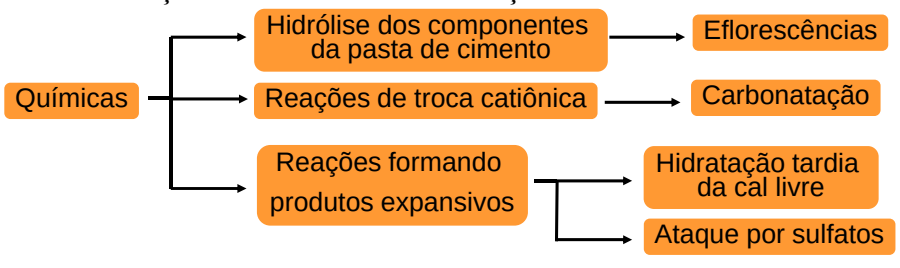
Tipos de Cimento	Resíduo Insolúvel (%)	Perda ao Fogo (%)	Teores de óxidos (%)		
			MgO	SO_3	CO_2
CPI	≤ 1,0	≤ 2,0	≤ 6,5	≤ 4,0	≤ 1,0
CPI-S	≤ 5,0	≤ 4,5	≤ 6,5	≤ 4,0	≤ 3,0
CPII-E	≤ 2,5	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 4,0	≤ 5,0
CPII-Z	≤ 16,0	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 4,0	≤ 5,0
CPII-F	≤ 2,5	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 4,0	≤ 5,0
CPIII	≤ 1,5	≤ 4,5	-	≤ 4,0	≤ 3,0
CPIV	-	≤ 4,5	≤ 6,5	≤ 4,0	≤ 3,0
CPV-ARI	≤ 1,0	≤ 4,5	≤ 6,5	(*)	≤ 3,0
RS	-	≤ 4,5	≤ 6,5	(*)	≤ 3,0

(*) ≤ 3,5 para C3A ≤ 8,0% e ≤ 4,5 para C_3A > 8,0%

Instituto Brasileiro de Avaliações e Perícias de Engenharia – IBAPE CE
Seminário Nacional de Perícias de Engenharia

Introdução

• Classificação das causas da deterioração do concreto



Mehta e Monteiro, 2008

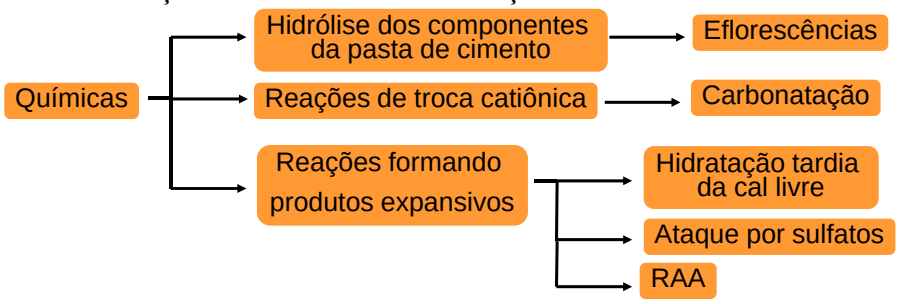
Introdução

• Classificação das causas da deterioração do concreto

Instituto Brasileiro de Avaliações e Perícias de Engenharia – IBAPE CE
Seminário Nacional de Perícias de Engenharia

Introdução

• Classificação das causas da deterioração do concreto



Mehta e Monteiro, 2008

Introdução

• Classificação das causas da deterioração do concreto

Instituto Brasileiro de Avaliações e Perícias de Engenharia – IBAPE CE
Seminário Nacional de Perícias de Engenharia

Introdução

• Classificação das causas da deterioração do concreto

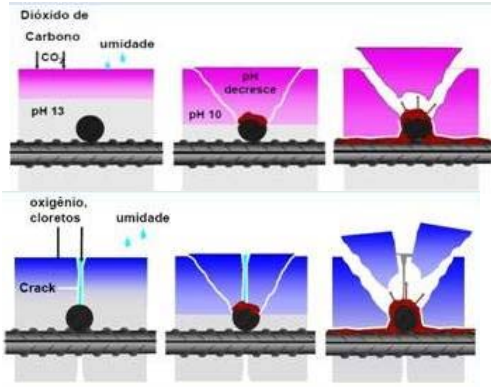
- Químicas
  - Hidrólise dos componentes da pasta de cimento → Eflorescências
  - Reações de troca catiônica → Carbonatação
  - Reações formando produtos expansivos
    - Hidratação tardia da cal livre
    - Ataque por sulfatos
    - RAA
    - Corrosão de armaduras

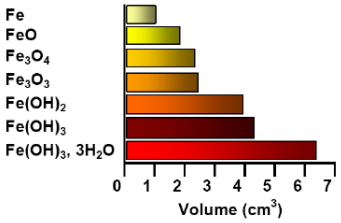
Mehta e Monteiro, 2008

Aspectos fundamentais na análise de problemas de patologias construtivas: ocorrência de *DEF* em fundações Prof. Eduardo Cabral (UFC)

Introdução

• Classificação das causas da deterioração do concreto

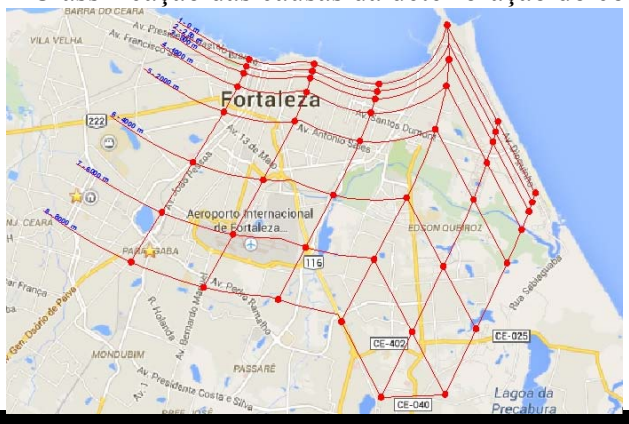




Instituto Brasileiro de Avaliações e Perícias de Engenharia – IBAPE CE
Seminário Nacional de Perícias de Engenharia

Introdução

• Classificação das causas da deterioração do concreto



Projeto Sinduscon-CE/ Coopercon-CE/Apodi/UFC

Introdução

• Classificação das causas da deterioração do concreto

- Químicas
  - Hidrólise dos componentes da pasta de cimento → Eflorescências
  - Reações de troca catiônica → Carbonatação
  - Reações formando produtos expansivos
    - Hidratação tardia da cal livre
    - Ataque por sulfatos
    - RAA
    - Corrosão de armaduras
    - Etringita Tardia - *DEF*

Mehta e Monteiro, 2008

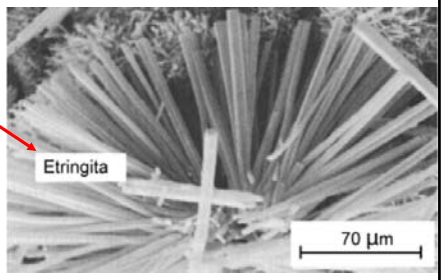
Instituto Brasileiro de Avaliações e Perícias de Engenharia – IBAPE CE
Seminário Nacional de Perícias de Engenharia

Definições

• Etringita

Cristal acicular de trissulfoaluminato de cálcio hidratado resultado da interação entre íons de cálcio, sulfato, aluminato e hidroxilas (Mehta e Monteiro, 2008).

$$[AlO_4]^{-} + 3[SO_4]^{-2} + 6[Ca]^{+2} + água \rightarrow C_6A\bar{S}3H_{32}$$



Aspectos fundamentais na análise de problemas de patologias construtivas: ocorrência de *DEF* em fundações Prof. Eduardo Cabral (UFC)

Definições

• Etringita Primária

Etringita formada após poucos minutos da hidratação do cimento, também chamada de *Early Ettringite Formation* (EEF), devido à reação do sulfato de cálcio ($CaSO_4.2H_2O$) com o aluminato de cálcio (C_3A) em meio aquoso (LCPC, 2009).

• Etringita Secundária

Ocorre no concreto já endurecido como resultado da contribuição de sulfatos externos (solos, água, etc), que penetram pela porosidade do concreto, ou de sulfatos internos, oriundos de agregados e da água de amassamento contaminados (LCPC, 2009).

Instituto Brasileiro de Avaliações e Perícias de Engenharia – IBAPE CE
Seminário Nacional de Perícias de Engenharia

Definições

• Etringita Tardia

Em inglês *Delayed Ettringite Formation* – DEF, ocorre quando os cristais de etringita formam-se meses ou anos após a hidratação do cimento, em concretos que foram expostos a elevadas temperaturas nas primeiras idades (LCPC, 2009).

Causas?

Consequências?

Prevenções?

Soluções?

Etringita tardia

• Causas

- Mecanismo de decomposição térmica

Quando a massa do concreto fresco atinge elevadas temperaturas na cura, a etringita não se forma ou fica quase totalmente desidratada transformando-se em monossulfoaluminato de cálcio. A conversão do monossulfoaluminato novamente em etringita, ocorre em função da presença de íons SO_4^{-2} no sistema, ou seja, sulfatos internos ou intrínsecos à pasta. A presença de água é importante, pois intervém nos processos de transferência e de formação dos produtos da reação.

- Deutsche Ausschufβ für Stahlbeton (1989) → 60°C
- Guide Technique of LCPC (2009) → 65°C
- Portland Cement Association (1992) → 70°C
- Mehta e Monteiro (2008) → 65°C
- EN 13670 (2001) → 70°C

Instituto Brasileiro de Avaliações e Perícias de Engenharia – IBAPE CE
Seminário Nacional de Perícias de Engenharia

Etringita tardia

• Consequências

Etringita tardia

• Consequências

- Perda de resistência mecânica
- Perda de aderência aço-concreto
- Perda de durabilidade
- Perda de monolitismo da peça estrutural
- Perda...
- Perda...
- Perda...

Fissuração

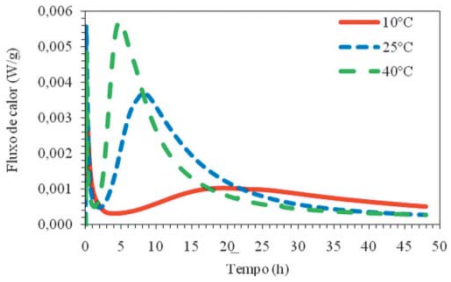
Instituto Brasileiro de Avaliações e Perícias de Engenharia – IBAPE CE
Seminário Nacional de Perícias de Engenharia

Etringita tardia

• Prevenções

- A temperatura máxima do concreto deve ser inferior a ~65°C

$$T_{concreto} = T_{ambiente} + \Delta T_{hidratação}$$



Cincotto, 2011

Etringita tardia

• Prevenções

- A temperatura máxima do concreto deve ser inferior a ~65°C

$$T_{concreto} = T_{ambiente} + \Delta T_{hidratação}$$

Resultados:

RESULTADO em J/g					
12h	24h	41h	72h	120h	168h
195	238	243	242	243	246
RESULTADO EM Cal/g					
47	57	58	58	58	59

Referência Normativa:

Normas	Tempo (h)	Calor Hidratação J/g	Classificação
NBR 13116/94 - Cimento Portland de baixo calor de hidratação	72	< 260	baixo calor de hidratação
	168	< 300	

Instituto Brasileiro de Avaliações e Perícias de Engenharia – IBAPE CE
Seminário Nacional de Perícias de Engenharia

Etringita tardia

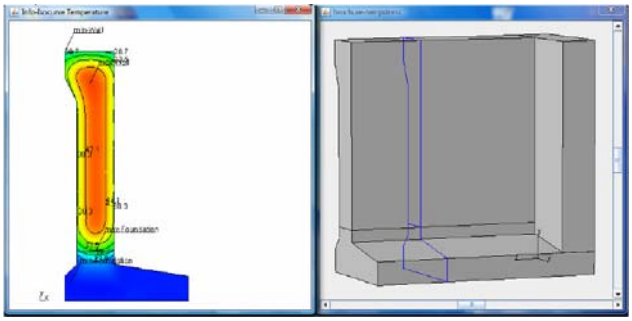
• Prevenções

Santos et al., 2011

Aspectos fundamentais na análise de problemas de patologias construtivas: ocorrência de *DEF* em fundações Prof. Eduardo Cabral (UFC)

Etringita tardia

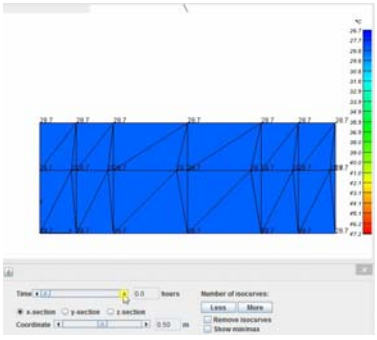
- Prevenções
  - Simulação em softwares apropriados das temperaturas máximas
    - PFEM_2DT
    - PFEM_2DAT
    - b4cast
    - Concrete Works



Instituto Brasileiro de Avaliações e Perícias de Engenharia – IBAPE CE
Seminário Nacional de Perícias de Engenharia

Etringita tardia

- Prevenções
  - Simulação em softwares apropriados das temperaturas máximas
    - PFEM_2DT
    - PFEM_2DAT
    - b4cast
    - Concrete Works



Aspectos fundamentais na análise de problemas de patologias construtivas: ocorrência de *DEF* em fundações Prof. Eduardo Cabral (UFC)

Etringita tardia

- Prevenções
  - Simulação em softwares apropriados das temperaturas máximas
    - PFEM_2DT
    - PFEM_2DAT
    - b4cast
    - Concrete Works
  - Elaboração de um plano de concretagem

Instituto Brasileiro de Avaliações e Perícias de Engenharia – IBAPE CE
Seminário Nacional de Perícias de Engenharia

Etringita tardia

- Soluções
  - Reestabelecer o monolitismo da peça estrutural
  - Inserir tensões de co

Aspectos fundamentais na análise de problemas de patologias construtivas: ocorrência de *DEF* em fundações Prof. Eduardo Cabral (UFC)

Estudo de Caso

- Blocos de coroamento
  - Edifício de aproximada
  - Blocos com dimensões
  - Volume de concreto =
  - f_{ck} = 45 MPa
  - Cimento empregado: C

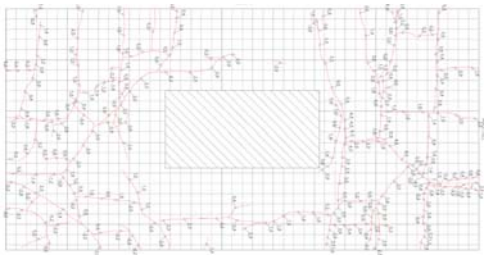
Torres et al., 2012

Instituto Brasileiro de Avaliações e Perícias de Engenharia – IBAPE CE
Seminário Nacional de Perícias de Engenharia

Estudo de Caso

- Blocos de coroamento
  - Mapas de fissuras

Topo



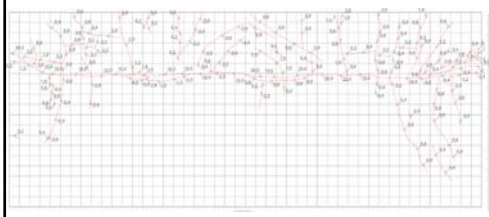
Torres et al., 2012

Aspectos fundamentais na análise de problemas de patologias construtivas: ocorrência de *DEF* em fundações Prof. Eduardo Cabral (UFC)

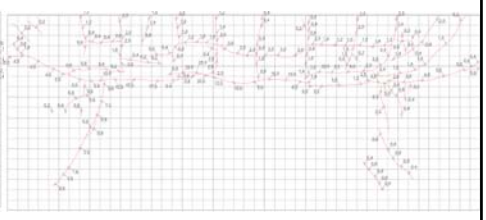
Estudo de Caso

- Blocos de coroamento
  - Mapas de fissuras

Face Leste



Face Oeste



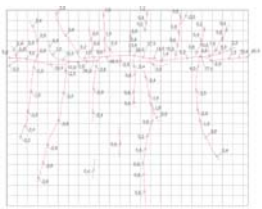
Torres et al., 2012

Instituto Brasileiro de Avaliações e Perícias de Engenharia – IBAPE CE
Seminário Nacional de Perícias de Engenharia

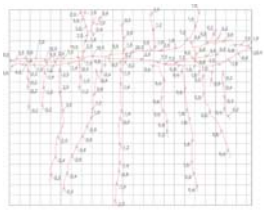
Estudo de Caso

- Blocos de coroamento
  - Mapas de fissuras

Face Sul



Face Norte



Torres et al., 2012

Estudo de Caso

- Blocos de coroamento
  - Extração de corpos de prova

Torres et al., 2012

Instituto Brasileiro de Avaliações e Perícias de Engenharia – IBAPE CE
Seminário Nacional de Perícias de Engenharia

Estudo de Caso

- Blocos de coroamento
  - Realização de análises (IPT)
    - Análises petrográficas
    - Difratometria de Raios X (DRX)
    - Microscopia eletrônica de varredura (MEV)
    - Análise por dispersão de energia (EDS)
    - Análises químicas

Torres et al., 2012

Aspectos fundamentais na análise de problemas de patologias construtivas: ocorrência de *DEF* em fundações Prof. Eduardo Cabral (UFC)

Estudo de Caso

- Blocos de coroamento
  - Realização de análises (IPT)

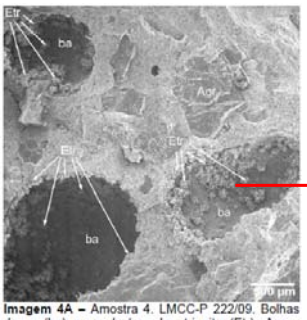


Imagem 4A – Amostra 4. LMCC-P 222/09. Bolhas de ar (ba) com *clusters* de etringita (Etr). Agr = agregado. Imagem de elétrons secundários. Aumento 35x.

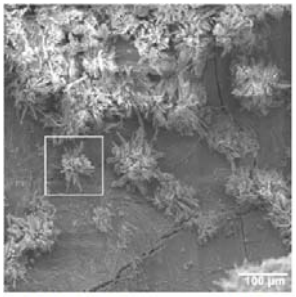


Imagem 5A – Amostra 4. LMCC-P 222/09. Interior da bolha de ar à direita na Imagem 4A. Quadrado destaca cluster de etringita. Imagem de elétrons secundários. Aumento 200x.

Torres et al., 2012

Instituto Brasileiro de Avaliações e Perícias de Engenharia – IBAPE CE
Seminário Nacional de Perícias de Engenharia

Estudo de Caso

- Blocos de coroamento
  - Realização de análises (IPT)

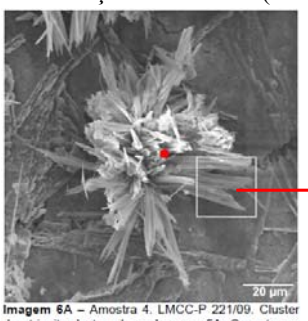


Imagem 6A – Amostra 4. LMCC-P 221/09. Cluster de etringita destacado na Imagem 5A. O ponto em vermelho indica local de análise por EDS. Imagem de elétrons secundários. Aumento 1000x.

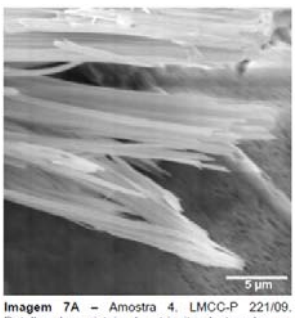


Imagem 7A – Amostra 4. LMCC-P 221/09. Detalhe dos cristais de etringita destacados na Imagem 6A. Notar hábito acicular. Imagem de elétrons secundários. Aumento 5000x.

Torres et al., 2012

Estudo de Caso

- Blocos de coroamento
  - Realização de análises (IPT)

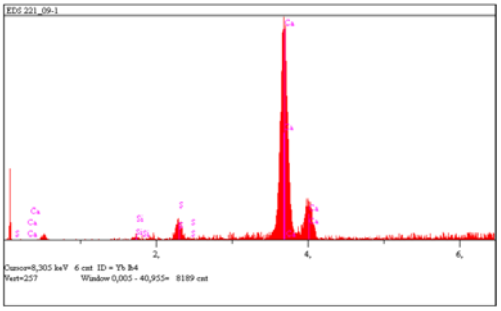


Figura 1A – Espectro EDS característico da etringita, referente ao ponto indicado na Imagem 2A, ressaltando-se a presença de cálcio (Ca) e enxofre (S).

Torres et al., 2012

Instituto Brasileiro de Avaliações e Perícias de Engenharia – IBAPE CE
Seminário Nacional de Perícias de Engenharia

Estudo de Caso

- Blocos de coroamento
  - Realização de análises (IPT)

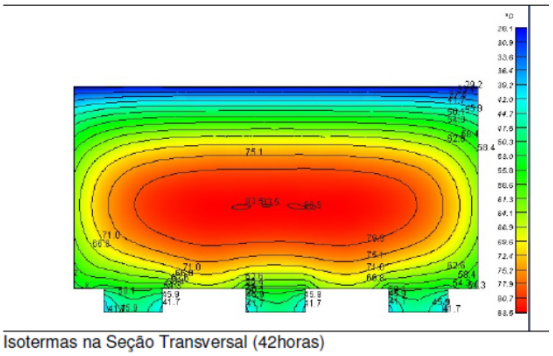
Parâmetros calculados, em massa		Resultados		
		"Concreto AM 02" (LMCC-Q N.º 23.782)	"Concreto AM 04" (LMCC-Q N.º 23.783)	"Concreto AM 05" (LMCC-Q N.º 23.784)
Valores médios	Cimento, em %	35,1	27,9	30,6
	Agregado, em %	66,0	73,1	70,3
	Traço (cimento : agregado)	1 : 1,9	1 : 2,6	1 : 2,3
	Consumo de cimento, em kg/m³	633	537	575

Torres et al., 2012

Aspectos fundamentais na análise de problemas de patologias construtivas: ocorrência de *DEF* em fundações Prof. Eduardo Cabral (UFC)

Estudo de Caso

- Blocos de coroamento
  - Modelagem computacional - DESEK



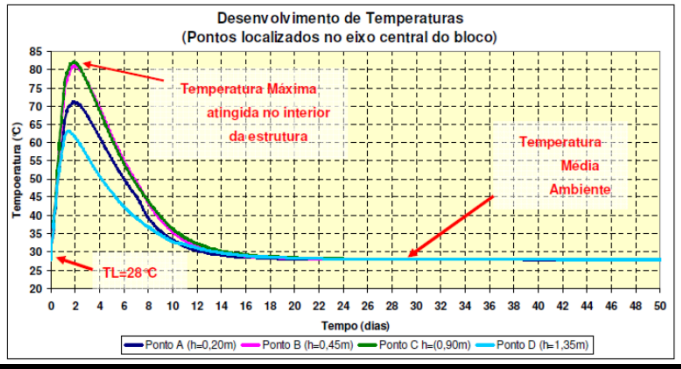
Isotermas na Seção Transversal (42horas)

Torres et al., 2012

Instituto Brasileiro de Avaliações e Perícias de Engenharia – IBAPE CE
Seminário Nacional de Perícias de Engenharia

Estudo de Caso

- Blocos de coroamento
  - Modelagem computacional - DESEK

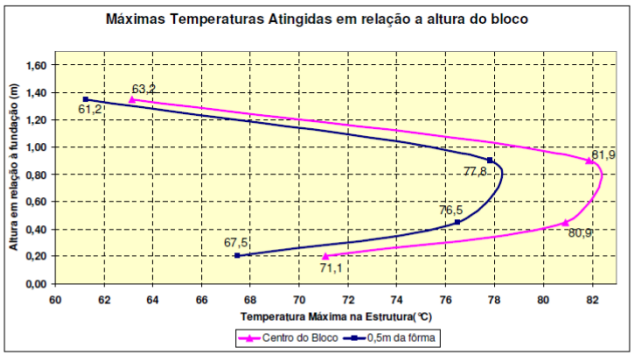


Torres et al., 2012

Aspectos fundamentais na análise de problemas de patologias construtivas: ocorrência de *DEF* em fundações Prof. Eduardo Cabral (UFC)

Estudo de Caso

- Blocos de coroamento
  - Modelagem computacional - DESEK



Torres et al., 2012

Instituto Brasileiro de Avaliações e Perícias de Engenharia – IBAPE CE
Seminário Nacional de Perícias de Engenharia

Estudo de Caso

- Blocos de coroamento
  - Terapia

Torres et al., 2012

Estudo de Caso

- Blocos de coroamento
  - Terapia

Torres et al., 2012

Instituto Brasileiro de Avaliações e Perícias de Engenharia – IBAPE CE
Seminário Nacional de Perícias de Engenharia

Estudo de Caso

- Blocos de coroamento
  - Terapia

Torres et al., 2012

Obrigado!

www.gpmate.ufc.br
eduardo.cabral@ufc.br