

Alternativas executivas para controle da elevação da temperatura do concreto massa de edificações

EDUARDO ISSAMU FUNAHASHI JR. - ENG. - ORCID <https://orcid.org/0000-0002-7516-4195>;

THOMAS HIDEKI KUNINARI - ENG. - ORCID <https://orcid.org/0000-0002-7632-5069>;

SELMO CHAPIRA KUPERMAN - ENG. - ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4186-2216>;

GRAZIELLE RIBEIRO VICENTE - ENG. - ORCID <https://orcid.org/0000-0002-1349-1377>;

CAIO FARTO FARINACIO - ENG. - ORCID <https://orcid.org/0000-0001-5590-796X> | DESEK LTDA.

RESUMO

OS RISCOS DE OCORRÊNCIA DE FISSURAS DE ORIGEM TÉRMICA E DEF (*DELAYED ETTRINGITE FORMATION*) EM ESTRUTURAS DE FUNDAÇÕES DE EDIFÍCIOS SÃO CADA VEZ MAIS COMUNS. PARA CONTROLAR A ELEVÇÃO DA TEMPERATURA INTERNA DO CONCRETO MASSA, DEVEM SER ELABORADOS PLANOS EXECUTIVOS DURANTE A FASE INICIAL DE PROJETO. ESTE TRABALHO APRESENTA ALTERNATIVAS CONSTRUTIVAS ADOTADAS PARA EMPREENDIMENTOS NO SUDESTE DO BRASIL, COM CONCRETOS DE RESISTÊNCIA DE ATÉ 45 MPa. AS ALTERNATIVAS FORAM DEFINIDAS A PARTIR DE ESTUDOS TÉRMICOS POR MEIO DE MODELAGENS MATEMÁTICAS CONSIDERANDO AS CARACTERÍSTICAS LOGÍSTICAS E AMBIENTAIS DA OBRA, ALÉM DOS TIPOS DE MATERIAIS CONSTITUINTES DO CONCRETO DISPONÍVEIS NA REGIÃO. PARA OS CASOS APRESENTADOS, FORAM ADOTADAS DIFERENTES ALTERNATIVAS COMO A PRÉ-REFRIGERAÇÃO DO CONCRETO COM O USO DE GELO E NITROGÊNIO LÍQUIDO, DIVISÃO DA EXECUÇÃO EM ETAPAS COM PREVISÃO DE JUNTAS DE CONCRETAGEM

E ZONEAMENTO DO f_{ck} . ALÉM DISSO, FORAM REALIZADOS OS MONITORAMENTOS DAS TEMPERATURAS INTERNAS DOS CONCRETOS DAS ESTRUTURAS, COMPROVANDO A IMPORTÂNCIA DA REALIZAÇÃO DE ESTUDOS TÉRMICOS PRÉVIOS PARA ELABORAÇÃO DO PLANO EXECUTIVO COM MENOR RISCO DE FISSURAÇÃO.

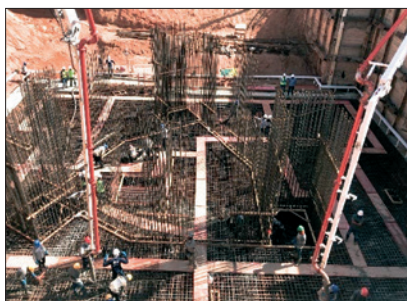
PALAVRAS-CHAVE: FISSURAS DE ORIGEM TÉRMICA, DEF, ALTERNATIVAS EXECUTIVAS, NITROGÊNIO LÍQUIDO, GELO.

1. INTRODUÇÃO

Vem sendo cada vez mais comum a especificação de concretos de elevada resistência em projetos de edifícios residenciais e comerciais nos grandes centros urbanos. Na maioria das vezes, demandam maior consumo de cimento em sua produção. A utilização de dosagens de concreto sem estudos prévios, escolha inadequada dos seus materiais constituintes e a falta de um planejamento executivo para as estruturas

em concreto massa podem resultar em elevado risco de fissuração. Dependendo das dimensões de estruturas de blocos de fundação e sapatas, pilares, lajes e vigas espessas, as fissuras de origem térmica e etringita tardia (DEF, *Delayed ettringite formation*) podem ocorrer devido à falta de controle do seu comportamento térmico. Em alguns casos, a execução dessas estruturas sem um planejamento adequado pode resultar em riscos de fissuração, mesmo para aquelas de menor volume e altura.

Concreto massa é, por definição do ACI (2009), 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 para minimizar a ocorrência de fissuração. Dependendo do consumo e tipo de cimento, da geometria da estrutura, das condições ambientais locais da obra e da temperatura de lançamento do concreto, poderão resultar em tensões de origem térmica superiores a resistência à tração do concreto. Isto ocorre quando da dissipação de calor para o meio ambiente e posterior retração, dependendo do gradiente térmico entre as diferentes partes da estrutura e condições de restrição. Além do risco de fissuração por origem térmica, é desejável evitar o risco de formação da DEF, que pode ocorrer em estruturas de concreto massa quando atingem temperaturas internas superiores a 65°C durante a hidratação do cimento, uma vez que os sulfatos internos podem incorporar outras fases do cimento. Este tipo de ataque interno por sulfatos pode ocorrer meses ou alguns anos após a execução da estrutura, ocasionando uma



A



B

FIGURA 1

VISTA GERAL DA CONCRETAGEM DO BLOCO DE FUNDAÇÃO – CASO 1

reação expansiva e progressiva que provoca um intenso quadro fissuratório no tempo. No caso da DEF, prejudica propriedades mecânicas, como o módulo de elasticidade e resistências à compressão e à tração, já tendo sido observadas inclusive reduções de mais de 50% (Schovanz *et al.*, 2021). A redução nas resistências causadas por DEF pode ser inclusive mais extrema que as causadas por reação álcali-agregado (Godart & Wood, 2022). Em condições propícias, Hasparyk *et al.* (2012) mostraram o ataque combinado de RAA e DEF em concreto de bloco fundação de edificação no Brasil.

É perfeitamente viável, no entanto, evitar este tipo de problema (Hasparyk & Kuperman, 2021) e, para isto, as alternativas executivas podem ser avaliadas por meio de estudos térmicos ainda na fase inicial de projeto. Funahashi *et al.* (2022) apresentaram estudo de caso realizado para sapata com volume de cerca de 1400 m³, executada em etapas de menor altura, considerando juntas de construção vertical e horizontal que propiciou menor consumo de gelo no concreto. Nesta fase é possível prever os custos para a pré-refrigeração de algum material e/ou pós-refrigeração do concreto, além da avaliação dos impactos no cronograma da obra, caso seja necessária a sua concretagem em mais de uma etapa. A redução da altura da camada, execução em etapas prevendo juntas de construção verticais e/ou horizontais, emprego de material pozolânico como substituição parcial do cimento e escolha de cimentos de baixo calor de hidratação contribuem para minimizar os riscos de fissuração devido ao calor. Além desses, o aumento da idade de controle do f_{ck} para idade superior a 28 dias, uso de agregados de menor módulo de elasticidade, redução da resistência característica à compressão e/ou zoneamento das classes de concreto contribuem para reduzir estes riscos.

Neste artigo são apresentados três estudos de casos, onde foram empregadas diferentes alternativas executivas em acordo com as condições logísticas e ambientais de cada obra, especificações de projeto, dosagens de concretos previamente estudadas com os materiais disponíveis na região e cronogramas elaborados ainda na fase inicial de projeto. As alternativas construtivas escolhidas para cada caso foram baseadas em estudos de evolução tridimensional de temperaturas e tensões, com o uso do *software*

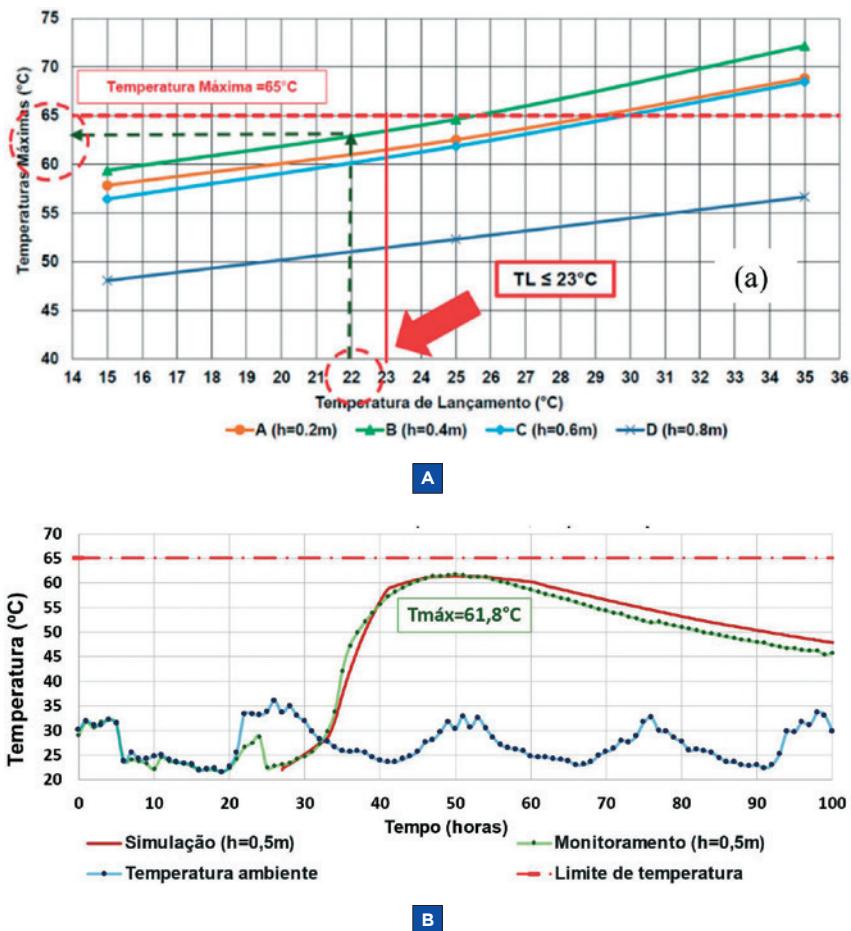


FIGURA 2

(A) RESUMO DAS MÁXIMAS TEMPERATURAS CALCULADAS PARA DEFINIÇÃO DO ZONEAMENTO DAS TEMPERATURAS DE LANÇAMENTO E (B) TEMPERATURAS MONITORADAS X TEMPERATURAS SIMULADAS PARA A PRIMEIRA ETAPA DE CONCRETAGEM – CASO 1

b4cast, baseado no método dos elementos finitos. 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.

2. ESTUDOS DE CASO

2.1 Caso 1 – Ícone Planeta – Sorocaba | SP

O edifício Ícone (Figura 1) está em construção na cidade de Sorocaba – SP

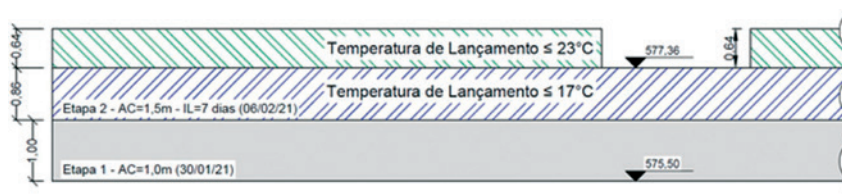


FIGURA 3

ZONEAMENTO DAS TEMPERATURAS DE LANÇAMENTO DO CONCRETO DA SEGUNDA ETAPA DE CONCRETAGEM – CASO 1

TABELA 1

ESPECIFICAÇÕES PARA A CONCRETAGEM DA SEGUNDA ETAPA DO RADIER – CASO 1

Temperatura de lançamento do concreto fresco	Etapa 1	Etapa 2	
	≤ 22°C	≤ 17°C	≤ 23°C
Altura de concretagem (m)	Da base até 1,0 m	Entre 1,00 m e 1,86 m	Entre 1,86 m e 2,5 m
Volume aproximado (m ³)	420	315	245
Quantidade estimada de caminhões-betoneira	60	45	35
Consumo de gelo estimado por meio de balanço térmico (kg/m ³)	94	108	95
Temperatura dos agregados (°C)	22	25	30
Tempo de concretagem estimado com 3 bombas	6 horas	4 horas	3 horas
Alvenaria com tijolos	1,00	1,25	1,25

pela Construtora Planeta. A edificação residencial foi projetada pelo escritório França & Associados com 44 pavimentos e pouco mais de 140 m de altura, sendo considerado o edifício mais alto em construção no interior do estado.

Para a execução do radier com volume de cerca de 980 m³, no final de janeiro de 2021, foram estudados planos executivos em acordo com a capacidade de fornecimento da concreteira da região. Para garantir a maior velocidade de execução, o concreto foi fornecido por duas centrais e três pontos de carga, com fornecimento exclusivo neste dia.

Considerando as altas temperaturas para a época, inicialmente foi prevista a sua execução em três etapas distintas com camadas de 1 m de altura, cada, com intervalo de 7 dias, entre elas, e volumes iguais a 330 m³, aproximadamente. Após reavaliação estrutural ainda na fase inicial de projeto, foi possível uma redução da altura total do radier de 3 m para 2,5 m. Com isso, a primeira etapa com altura de camada igual a 1 m foi executada com concreto pré-refrigerado com substituição parcial da água por gelo, lançado a 22°C, no máximo, resultando em temperatura máxima monitorada igual a 62°C (Figura 2). A Tabela 1 mostra as especificações para concretagem do bloco. Com base na retroanálise a partir dos dados de monitoramento realizado para a primeira camada, verificou-se a possibilidade da sua execução em mais uma etapa de 1,5 m de altura, ao invés de mais duas, como previsto inicialmente.

A partir da alteração do plano executivo, foi definido novo zoneamento de temperaturas de lançamento do concreto, menores que as consideradas anteriormente,

com maior altura da camada (Figura 3). Assim, definiu-se o plano executivo para a segunda etapa de concretagem, com volume de 560 m³, lançada após sete dias da execução da primeira etapa.

Para garantir as menores temperaturas no lançamento, a operação de concretagem da segunda etapa foi iniciada às 4h30 da manhã, quando a temperatura ambiente e dos materiais são mais amenas e contribuem para alcançar os menores níveis de refrigeração do concreto. A menor temperatura especificada foi de 17°C até a altura de 86 cm em relação ao topo da camada anterior. As máximas temperaturas monitoradas no interior do concreto variaram de 56°C até 65°C, dependendo do seu local de instalação. Para o monitoramento, foi utilizado equipamento *datalogger* e termopares tipo “K” com aquisição automática das leituras a cada 1 hora. A Figura 4 mostra detalhes da execução da estrutura.

**A****B****C****D****FIGURA 4**

(A) CARREGAMENTO DE GELO NO CAMINHÃO BETONEIRA, (B) VISTA GERAL DA EXECUÇÃO COM INÍCIO NA MADRUGADA, (C) RETARDADOR DE PEGA SUPERFICIAL PARA REALIZAÇÃO DO CORTE VERDE DO CONCRETO E (D) TERMOPARES INSTALADOS PARA MONITORAMENTO DAS TEMPERATURAS NO CONCRETO – CASO 1

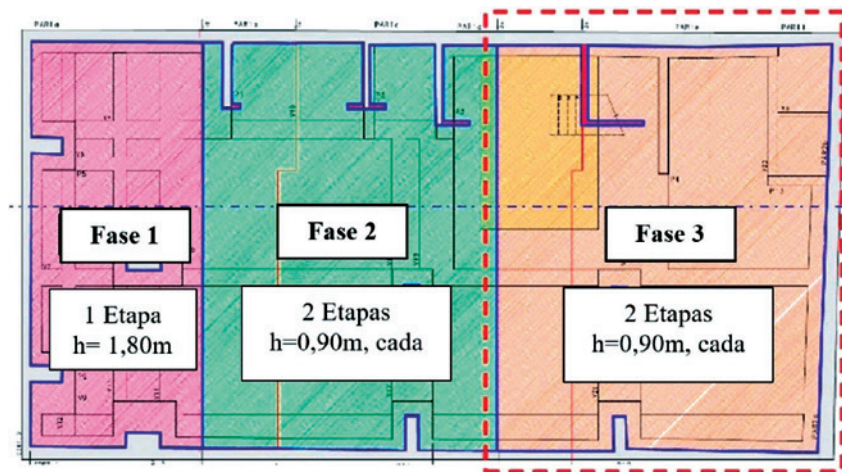


FIGURA 5

(A) SEÇÃO EM PLANTA DAS FASES EXECUTIVAS 1, 2 E 3 - CASO 2

2.2 Caso 2 - Hotel Marina - Rio de Janeiro | RJ

A edificação original é da década de 1980. Durante as obras de *retrofit* do Hotel Marina, da BHG, localizado na orla da praia do Leblon e projetado pelo escritório Pedreira Onix, foi realizada a execução de um radier com concreto pré-refrigerado com gelo e nitrogênio líquido. Este foi um dos primeiros casos em que se utilizou a pré-refrigeração do concreto por meio da injeção de nitrogênio líquido associado ao gelo em projetos de edificações no país.

Durante a fase inicial de projeto, foram realizadas visitas técnicas em três possíveis fornecedores de concreto da região para avaliação das suas instalações, qualidade, tipos de materiais e capacidade de fornecimento do concreto usinado. A partir das visitas, foram classificados dois fornecedores de concreto para serem realizados estudos laboratoriais para definição do traço do concreto massa. Foram coletadas amostras de cimentos diretamente dos silos das centrais escolhidas para realização de ensaios de determinação do calor de hidratação no laboratório da ABCP, em São Paulo/SP. Com base nos traços de concreto dos fornecedores, resultados dos ensaios mecânicos e de calor de hidratação, condições logísticas e ambientais da obra na época da construção, foram realizados estudos térmicos para definição dos planos executivos. Devido ao maior tempo de transporte entre a central e a obra, e a impossibilidade de se complementar a refrigeração com gelo na região do empreendimento, houve a necessidade da execução

da estrutura em três fases distintas, prevendo juntas de construção verticais e horizontais, sendo: Fase 1 (área da base igual a 63 m² e volume de 101 m³, executada em única camada de concretagem com altura igual a 1,80 m); Fase 2 (área de 109 m² e volume de 172 m³, executada em duas camadas de 0,90 m de altura, cada) e Fase 3 (área de 121 m² e volume de 185 m³, execu-

tada em duas camadas com altura igual a 0,90 m, cada), conforme mostra Figura 5.

A partir dos estudos térmicos, verificou-se que para a execução da Fase 1 com altura de 1,80 m, a temperatura de lançamento do concreto deveria ser de, no máximo, 18°C até a altura de 1,2 m e de 25°C entre 1,20 m e 1,80 m de altura. Previamente à concretagem, realizou-se teste com o concreto pré-refrigerado simulando o percurso do caminhão betoneira até a obra empregando adição total de gelo (140 kg/m³), desconsiderando apenas a umidade dos agregados graúdos e miúdos, além da água do corte igual a 10 litros/m³. Através do teste, comprovou-se que não seria possível lançar o concreto apenas com substituição parcial da água por gelo, considerando o seu tempo de transporte de 1h30 min, aproximadamente, e as altas temperaturas ambientes superiores a 35°C no verão daquele ano. Para atender o cronograma e especificação de projeto, a execução da primeira fase foi realizada com o uso de gelo e nitrogênio líquido adicionados diretamente no caminhão



A



B



C



D

FIGURA 6

(A) INJEÇÃO DE NITROGÊNIO LÍQUIDO NO INTERIOR DO BALÃO DO CAMINHÃO (B) JUNTA DE CONSTRUÇÃO VERTICAL COM FÔRMA DE TELA DE METAL EXPANDIDO, (C) DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA DO CONCRETO NA USINA APÓS A INJEÇÃO DE NITROGÊNIO LÍQUIDO (3,2°C) E (D) REFRIGERAÇÃO DOS AGREGADOS GRAÚDOS NAS BAIAS COM O EMPREGO DA ASPERSÃO DE ÁGUA

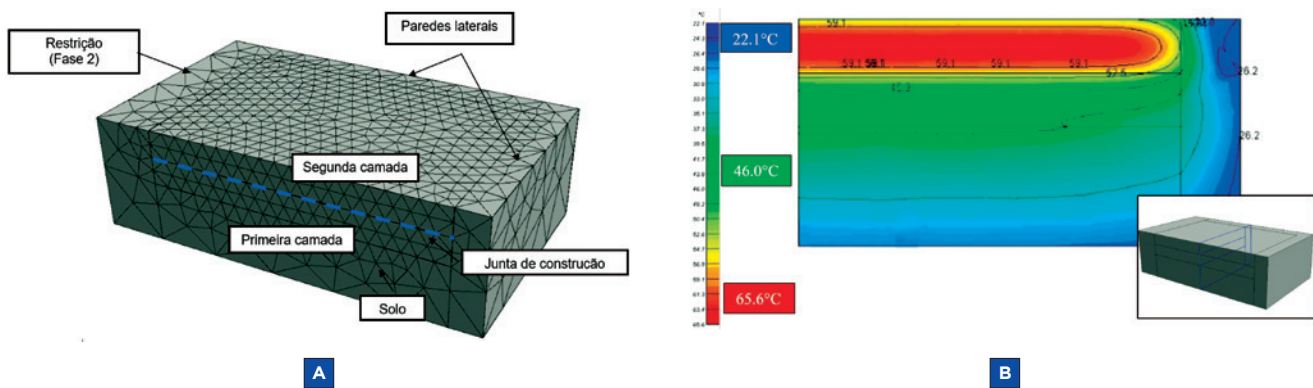


FIGURA 7

(A) MALHA DE ELEMENTOS FINITOS EM 3D (SOFTWARE B4CAST) E (B) ISOTERMAS NA SEÇÃO TRANSVERSAL CONSIDERANDO TEMPERATURA DE LANÇAMENTO IGUAL A 30°C – CASO 2

betoneira. Para que o concreto fosse lançado com temperatura inferior à especificada, este era liberado, na central, com temperatura inferior a 7°C após a injeção de nitrogênio. A Figura 6 mostra registros feitos durante a execução da primeira fase de concretagem.

A máxima temperatura monitorada atingida pelo concreto da Fase 1 com utilização de nitrogênio líquido e gelo foi de 61°C. Para a Fase 2, executada em duas camadas de concretagem de mesma altura, com emprego de concreto pré-refrigerado com gelo, foi de 56°C e 61°C para a primeira e segunda

camadas, respectivamente. Após período de paralisação da obra devido a pandemia da Covid-19, a terceira e última etapa de concretagem foi executada em maio de 2021 com outro fornecedor de concreto. Foi realizado novo estudo térmico para definição do plano executivo, onde a concretagem foi executada em duas camadas de 0,90 m, cada, com emprego de cimento CP III com adição de sílica ativa no traço e pré-refrigeração com gelo, no qual as máximas temperaturas internas no concreto da estrutura não ultrapassaram 50°C segundo o monitoramento

realizado. A Figura 7 (a) mostra malha de elementos finitos em 3D considerando simetria e, da Figura 7 (b), consta exemplo de isothermas considerando hipótese de lançamento do concreto a 30°C para a segunda etapa da Fase 3.

2.3 Caso 3 - Signature Eztec - São Paulo | SP

O empreendimento Signature em construção pela Construtora Eztec em dezembro de 2021 na cidade de São Paulo - SP é um edifício residencial de duas torres que possuem 24 e 28 pavimentos, com altura de 90 m, aproximadamente, na maior torre. O empreendimento foi projetado pelo escritório SRTC Engenharia e Projetos. Na fundação (Figura 8), o maior bloco projetado possui volume de 195 m³ com 3 m de altura, sendo o concreto especificado com f_{ck} de 45 MPa.

A partir dos cálculos térmicos realizados verificou-se que não seria possível executar a estrutura em única etapa de concretagem mesmo empregando cimento CP III e concreto pré-refrigerado com gelo, considerando a sua execução em época do ano com maiores temperaturas ambiente. Para viabilizar a execução do bloco de fundação em única etapa de concretagem, foi adotado o zoneamento das classes de resistência do concreto a partir de reavaliação estrutural da Projetista, conforme a Figura 9 (a). Com base no zoneamento de f_{ck} e utilização de adição pozolânica e aditivo superplastificante, foi possível reduzir o consumo de aglomerante em 26 kg/m³ para o traço de f_{ck} = 45 MPa, em 42 kg/m³ para o traço de f_{ck} = 40 MPa e em 20kg/m³ para o traço de f_{ck} = 35 MPa em relação aos traços inicialmente propostos pelo fornecedor de concreto. Esta alternativa



FIGURA 8

(A) VISTA GERAL DO TERRENO DO EMPREENDIMENTO E (B) LANÇAMENTO DO CONCRETO NO BLOCO DE FUNDAÇÃO COM ALTURA DE 3 M – CASO 3

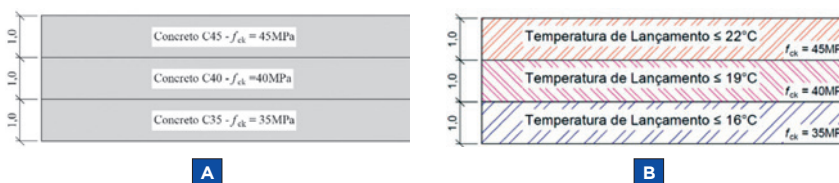


FIGURA 9

(A) ZONEAMENTO DAS CLASSES DE CONCRETO (f_{ck}) E (B) ESPECIFICAÇÃO DAS TEMPERATURAS DE LANÇAMENTO DO CONCRETO PRÉ-REFRIGERADO



FIGURA 10

(A) ARMAZENAMENTO DE GELO NO CAMINHÃO FRIGORÍFICO EM OBRA, PARA EVENTUAL AJUSTE; (B) PROTEÇÃO DO EQUIPAMENTO DATALOGGER PARA MONITORAMENTO DAS TEMPERATURAS DO CONCRETO POR MEIO DE TERMOPARES (C) ENSAIO DE ABATIMENTO COM TRONCO DE CONE (SLUMP) NO RECEBIMENTO DO CONCRETO PARA VERIFICAÇÃO DA TRABALHABILIDADE (18 CM) E (D) AFERIÇÃO DA TEMPERATURA DO CONCRETO NO SEU LANÇAMENTO (17,5°C)

permitiu que houvesse uma redução de 4°C na elevação adiabática estimada para as classes C40 e C45 e de 14°C para a classe C35, comparada a execução com único traço de concreto com $f_{ck} = 45$ MPa. Através deste zoneamento, foi possível reduzir as máximas temperaturas internas do concreto da estrutura e reduzir os riscos de fissuração. Além do zoneamento das classes de f_{ck} , foi realizado zoneamento das temperaturas de lançamento do concreto fresco conforme mostra a Figura 9 (b). A máxima temperatura monitorada no bloco foi de 60°C após aproximadamente 75 horas do início da concretagem, no centro da estrutura à 1,50 m de altura em relação ao lastro.

3. DISCUSSÃO SOBRE AS ALTERNATIVAS EXECUTIVAS

A Tabela 2 apresenta o resumo das alternativas adotadas para a execução das fundações de cada um dos casos estudados para estruturas projetadas com f_{ck} de 40 MPa e 45 MPa.

A Tabela 3 apresenta informações referentes aos cimentos utilizados para a produção dos traços de concreto.

A Tabela 4 mostra o resumo das alternativas executivas definidas por meio dos estudos térmicos e a Tabela 5 mostra dados do monitoramento térmico realizada para os casos 1, 2 e 3.

Para todos os casos estudados, a realização de estudos de dosagens prévios para a definição do traço do concreto focando na redução do consumo de cimento, independentemente do tipo, resultou em

menor aumento de temperatura interna do concreto da estrutura.

O conhecimento das propriedades mecânicas e térmicas dos concretos, condições ambientais e de logística de execução, além do conhecimento do calor de hidratação dos cimentos, possibilitaram definir, por meio

dos estudos térmicos, o plano executivo mais adequado para cada caso.

A elaboração do plano executivo na fase inicial de projeto com a participação do projetista, construtora, fornecedor de concreto e empresa de controle tecnológico foi fundamental para reduzir os

TABELA 2

RESUMO DOS CASOS ESTUDADOS

Empreendimento	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Características de projeto			
Localização	São Paulo (2021)	Rio de Janeiro (2019) ⁽¹⁾ (2021) ⁽²⁾	São Paulo (2021)
Volume total (m ³)	980	460	195
Altura total (m)	2,5	1,8	3,0
f_{ck} (28 dias)	45	40	35 ⁽³⁾ , 40 ⁽⁴⁾ e 45 ⁽⁵⁾
E_{cs} (28 dias)	30	24	—
Dosagem do concreto			
Tipo de cimento	CP II	CP II ⁽¹⁾ CP III ⁽²⁾	CP III
Fabricante	A	B ⁽¹⁾ e C ⁽²⁾	D
Consumo de aglomerante (kg/m ³)	335	361 ⁽¹⁾ 410 ⁽²⁾	318 ⁽³⁾ 330 ⁽⁴⁾ 385 ⁽⁵⁾
Adição de material pozolânico (kg/m ³)	25 ⁽⁶⁾	31 ⁽¹⁾ 35 ⁽²⁾	20 ⁽³⁾ 20 ⁽⁴⁾ 22 ⁽⁵⁾
Consumo de material pozolânico como substituição parcial do cimento (%)	4	8 ⁽¹⁾ 8 ⁽²⁾	— ⁽³⁾ 7 ⁽⁴⁾ 6 ⁽⁵⁾
Elevação adiabática estimada (°C)	52	51 ⁽¹⁾ 55 ⁽²⁾	46 ⁽³⁾ 48 ⁽⁴⁾ 56 ⁽⁵⁾
Coefficiente de elevação da temperatura teórico (°C/kg/m ³)	0,150	0,130 ⁽¹⁾ 0,123 ⁽²⁾	0,145 ⁽³⁾ 0,145 ⁽⁴⁾ 0,145 ⁽⁵⁾

NOTAS: (1) FASES 1 E 2 - CASO 2; (2) FASE 3 - CASO 2; (3) $f_{ck} = 35$ MPa - CASO 3; (4) $f_{ck} = 40$ MPa - CASO 3; (5) $f_{ck} = 45$ MPa - CASO 3; (6) SILÍCA DISPERSA EM ÁGUA, SENDO 50% EM MASSA DE ÁGUA-CASO 1.

cronogramas das obras e atender às especificações de projeto, além de reduzir os riscos de fissuração de origem térmica e formação da DEF. A realização de retroanálises por modelagens matemáticas, com os dados de monitoramento das temperaturas de estruturas de menor volume ou quando da primeira etapa de concretagem, possi-

bilitou a alteração dos planos executivos, viabilizando menos etapas de concretagem.

A utilização de nitrogênio líquido adicionado diretamente no balão do caminhão betoneira e/ou na esteira dos agregados é uma solução eficiente para a pré-refrigeração do concreto a níveis mais baixos que os possíveis com gelo. Estas alternativas

podem ser associadas dependendo das condições ambientais locais, tempo de transporte entre a central e obra e altura da camada de concretagem.

Quando possível, o zoneamento das classes de concreto, permitindo lançamento de concreto com menor f_{ck} próximo à sua base, onde geralmente a restrição é maior, diminui a probabilidade de fissuração de origem térmica, além de reduzir as máximas temperaturas internas no concreto devido à redução do consumo de cimento para os traços de classes de resistência menores.

TABELA 3

INFORMAÇÕES SOBRE OS CIMENTOS UTILIZADOS

Empreendimento	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Características do cimento			
Tipo de cimento	CP II	CP II ⁽¹⁾ CP III ⁽²⁾	CP III
Fabricante	A	B ⁽¹⁾ e C ⁽²⁾	D
Área específica (cm ² /g)	5225	4284 ⁽¹⁾ 4229 ⁽²⁾	4366
Calor de hidratação às 41h de idade (J/g)	323	289 ⁽¹⁾ 262 ⁽²⁾	265
Calor de hidratação às 168h de idade (J/g)	332	297 ⁽¹⁾ 292 ⁽²⁾	304
Data da coleta da amostra para ensaio de calor de hidratação	Jun/2020	ago/2019 ⁽¹⁾ jul/2020 ⁽²⁾	Set/2020

Notas: (1) FASES 1 E 2 - CASO 2; (2) FASE 1 - CASO 2

TABELA 4

RESUMO DAS ALTERNATIVAS EXECUTIVAS DEFINIDAS POR MEIO DOS ESTUDOS TÉRMICOS

Empreendimento	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Redução da altura das camadas?	Sim	Não ⁽¹⁾ Sim ⁽²⁾	Não
Divisão em etapas de menor volume (juntas de construção)?	Sim	Sim	Não
Pré-refrigeração do concreto	Gelo	Gelo+Nitrogênio ⁽²⁾ Gelo ⁽³⁾	Gelo

Notas: (1) FASE 1 DA EXECUÇÃO - CASO 2; (2) FASES 2 E 3 DA EXECUÇÃO - CASO 2

TABELA 5

CONTROLE TECNOLÓGICO DO CONCRETO - MONITORAMENTO DAS TEMPERATURAS POR INSTRUMENTAÇÃO

Empreendimento	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Temperatura local ⁽¹²⁾ (°C)	20 - 35	25 - 35	18-34
Altura da camada (m)	1,0 ⁽¹⁾ 1,5 ⁽²⁾	1,80 ⁽³⁾ 0,90 ⁽⁴⁾	3
Temperatura de lançamento média do concreto (°C)	20 ⁽¹⁾ 15 ⁽²⁾	17 ⁽³⁾ 21 ⁽⁵⁾ e 22 ⁽⁶⁾ 20 ⁽⁷⁾ e 22 ⁽⁸⁾	15 ⁽⁹⁾ 18 ⁽¹⁰⁾ 20 ⁽¹¹⁾
Temperatura máxima monitorada no interior da estrutura (°C)	61 ⁽¹⁾ 65 ⁽²⁾	61 ⁽³⁾ 56 ⁽⁵⁾ e 61 ⁽⁶⁾ 44 ⁽⁷⁾ e 48 ⁽⁸⁾	60

Notas: (1) PRIMEIRA ETAPA DE CONCRETAGEM - CASO 1; (2) SEGUNDA ETAPA DE CONCRETAGEM, - CASO 1; (3) FASE 1 - ÚNICA ETAPA - CASO 2; (4) FASES 1 E 2 - ETAPAS 1 E 2 - CASO 2; (5) FASE 2 - PRIMEIRA ETAPA - CASO 2; (6) FASE 2 - SEGUNDA ETAPA - CASO 2; (7) FASE 3 - PRIMEIRA ETAPA - CASO 2; (8) FASE 3 - SEGUNDA ETAPA - CASO 2; (9) f_{ck} = 35 MPa - (ALTURA = 1 M) - CASO 3; (10) f_{ck} = 40 MPa - (ALTURA = 1M) - CASO 3; (11) f_{ck} = 45 MPa - (ALTURA = 1 M) - CASO 3; (12) TEMPERATURA LOCAL MONITORADA POR INSTRUMENTAÇÃO

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As metodologias para avaliar o risco térmico para execução de estruturas de concreto massa em edificações vêm sendo aprimoradas e levam em conta diversos fatores intrínsecos ao concreto, a geometria, logística e as condições ambientais locais. Além destas metodologias de avaliação, as próprias técnicas construtivas para mitigação de problemas de origem térmica estão sendo aperfeiçoadas considerando as maiores resistências mecânicas atualmente especificadas e maior finura do cimento que resultam em maior geração de calor. Em alguns casos, apenas a utilização de gelo como substituição parcial da água de amassamento para a sua pré-refrigeração não é suficiente.

As seguintes alternativas podem ser consideradas para execução das estruturas de concreto com menor risco de fissuras de origem térmica e DEF:

- ▶ Estudos prévios de dosagens para definição daquela com menor consumo de cimento: para a sua redução podem ser utilizados materiais pozolânicos como substituição parcial do cimento, além de aditivos redutores de água e/ou superplastificantes;
- ▶ Utilização de cimentos de baixo calor de hidratação, quando disponíveis na região, além do controle dos teores de C_2A , SO_3 e álcalis na sua fabricação;
- ▶ Aumento da idade de controle da resistência característica (f_{ck}) para 63 ou 90 dias dependendo do tipo cimento a ser adotado;
- ▶ Zoneamento das classes de resistência do concreto e especificação de menor módulo de elasticidade a partir de reavaliação estrutural da Projetista;

- ▶ Estudos térmicos com o uso de modelagens matemáticas 3D pelo método dos elementos finitos para definir plano de concretagem ainda na fase inicial de projeto;
- ▶ Quando possível, programação das concretagens das fundações para épocas do ano com menor temperatura ambiente. A realização de concretagens em períodos noturnos, dependendo da região, ou com início na madrugada, quando a temperatura dos materiais e ambiente são amenas, contribuem para atingir menores níveis de temperatura no lançamento do concreto;
- ▶ Pré-refrigeração do concreto usinado por meio substituição parcial da água de amassamento por gelo na central e/ou no canteiro de obras;
- ▶ Pré-refrigeração do concreto com o uso de nitrogênio líquido adicionado diretamente ao balão do caminhão betoneira e/ou na esteira dos agregados, podendo ser associado ao gelo dependendo da distância entre a central e a obra e temperatura ambiente;
- ▶ Emprego de água refrigerada adicionalmente às técnicas de pré-refrigeração do concreto com gelo e/ou nitrogênio;
- ▶ Redução da altura da camada de concretagem, subdivisão da estrutura em segmentos de menor volume e altura, com previsão de juntas de construção verticais e/ou horizontais;
- ▶ Emprego de pós-refrigeração com a utilização de tubulação embutida no interior do concreto com passagem de água gelada, além do emprego de pré-refrigeração do concreto associada para viabilizar execuções de camadas de concretagem de maior altura. ☺

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ACI Committee 207, Mass and Thermally Controlled Concrete. American Concrete Institute, 2009.
- [2] GODART, B.; WOOD, J. Interaction of DEF and AAR, a review. 16th ICAAR - International Conference of Alkali-Aggregates Reaction in Concrete, First Book of Proceedings of the 16th ICAAR. Lisboa, 2021.
- [3] Estudo de caso envolvendo ataque combinado de RAA e DEF em concreto de fundação de edificação. In: Anais do 54^o Congresso Brasileiro do Concreto, Maceió, AL, 2012;
- [4] HASPARYK, N.P.; KUPERMAN, S. Reações expansivas deletérias no concreto. In: Concreto & Construções, Ed. 102, 2021.
- [5] FUNAHASHI JR, E. I.; KUPERMAN, S.C; VICENTE, G. R.; GRAZIANO, F.; MENDES, S.; NAPOLITANO, R. Plano de execução da sapata do edifício Faria Lima Plaza. In: Anais do Jubileu de Ouro do Congresso Brasileiro do Concreto, Brasília, DF, 2022;
- [6] SCHOVANZ, D.; TIECHER, F.; HASPARYK, N.P.; KUPERMAN, S.; LERMEN, R.T. Evaluation of Delayed Ettringite Formation through the Physical, Mechanical, and Microstructural Assays. ACI Materials Journal, V. 118, 2021.

Durabilidade do Concreto

Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente



Ed. JEAN-PIERRE OLLIVIER e ANGÉLIQUE VICHOT

Editores da tradução: Oswaldo CASCUDO e Helena CARASEK

DURABILIDADE DO CONCRETO

- **Editores** Jean-Pierre Ollivier e Angélique Vichot
- **Editora francesa** Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées – França
- **Coordenadores da edição em português** Oswaldo Cascudo e Helena Carasek (UFG)
- **Editora brasileira** IBRACON

Esforço conjunto de 30 autores franceses, coordenados pelos professores Jean-Pierre Ollivier e Angélique Vichot, o livro "Durabilidade do Concreto: bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente" condensa um vasto conteúdo que reúne, de forma atualizada, o conhecimento e a experiência de parte importante de membros da comunidade científica europeia que trabalha com o tema da durabilidade do concreto. A edição brasileira da obra foi enriquecida com o trabalho de tradução para a língua portuguesa e sua adaptação à realidade técnica e profissional nacional.

→ **Informações:** www.ibracon.org.br

DADOS TÉCNICOS

ISBN: 978-85-98576-22-0
 Edição: 1^a edição
 Formato: 18,6 x 23,3cm
 Páginas: 615
 Acabamento: Capa dura
 Ano da publicação: 2014

Patrocínio



FHECOR
DO BRASIL
Engenharia

