



Concreto e concretagem de blocos de fundação em concreto autoadensável e de alta resistência (70 MPa)

C. Brites¹; J. Gadea¹; M. Carvalho¹; P. Helene²

¹ PhD Engenharia.

² Universidade de São Paulo, USP & PhD Engenharia

Información del artículo

DOI:

<http://dx.doi.org/10.21041/ra.v6i1.113>

Artículo recibido el 30 de noviembre de 2015, revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 20 de enero de 2016. Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2016 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2016.

© 2016 ALCONPAT Internacional

Información Legal

Revista ALCONPAT. Año 6, No. 1, Enero – Abril 2016, es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A.C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: RevistaALCONPAT.

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, fecha de última modificación: 30 de marzo de 2016.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

RESUMO

O Edifício Comercial Brookfield Century Plaza, localizado em Alphaville, São Paulo, Brasil, foi projetado para ser apoiado em dois grandes blocos de concreto. Um concreto de alta resistência (70 MPa) e SCC auto adensável foi desenvolvido para estes dois blocos maciços de fundação (cada um medindo 28.4m x 18.6m por 4.5m de altura). Um modelo numérico empregando um software FEM foi desenvolvido para prever o ganho de hidratação térmica de diferentes camadas de concretagem, a fim de estabelecer o procedimento mais adequado para cumprir o cronograma e os requisitos de construção, sem fissurar. Diretrizes para controlar a produção do concreto na empresa de serviços de concretagem e procedimentos de como aplicá-lo no canteiro de obras foram estabelecidas e supervisionadas. Finalmente, as temperaturas internas do concreto foram registradas para permitir uma melhor calibração do modelo.

Palavras-chave: Concreto de alta resistência, concreto auto adensável, modelagem de concreto massa, produção de concreto refrigerado.

ABSTRACT

The Brookfield Century Plaza Commercial Building, located in Alphaville District, in São Paulo, Brazil, was designed to be supported by two direct foundation concrete blocks. A high strength (70 MPa), self-compacting concrete SCC was developed for these two massive foundation blocks (each one measures 28.4m x 18.6m by 4.5m, high). A numerical model by employing a FEM software was developed to predict the thermal hydration gain of different casting procedures, in order to establish the most appropriate one to meet the construction and schedule requirements without cracks. Directions to control concrete production at mixing plant and placing at construction site were established as well as supervised. Finally, internal concrete temperatures were recorded to enable a better model calibration.

Keywords: High strength concrete, self-compacting concrete, concrete modeling, refrigerated concrete production.

RESUMEN

El Edificio Comercial Brookfield Century Plaza, localizado en Alphaville, São Paulo, Brasil, fue diseñado para ser sostenido por dos grandes bloques de hormigón. Un hormigón de alta resistencia (70 MPa) y SCC auto compactante fue desarrollado para estos dos bloques masivos de fundación (cada un mide 28.4mx 18.6m por 4.5m de altura). Un modelo numérico utilizando un software FEM fue desarrollado para predecir la ganancia térmica de hidratación de diferentes capas de hormigonado con el fin de establecer el procedimiento más adecuado para cumplir con los requisitos de tiempo y de la construcción, sin que aparezcan fisuras. Fueron establecidos y supervisados procedimientos para controlar la producción de concreto en la empresa productora de concretos y aplicarlo en el sitio de construcción. Finalmente, la temperatura interna del concreto se registró para permitir una mejor calibración del modelo.

Palabras clave: concreto de alta resistencia, concreto autocompactante, concreto masivo, producción de concreto refrigerado.

Contact author: Carlos Brites (carlos.brites@concretophd.com.br)

1. INTRODUÇÃO

O Edifício Comercial Brookfield Century Plaza, localizado em Alphaville, São Paulo, Brasil, foi projetado para ser apoiado em dois grandes blocos de concreto. Cada um deles com dimensões de 28.4m x 18.6m por 4.5m de altura (o que representa um total de cerca de 2,400m³ ou 3,000yd³ de concreto) e contendo da ordem de 400t de aço. A resistência à compressão especificada em projeto foi de ≥ 70 MPa (10,000psi).



Figura 1. Perspectiva ilustrada do Edifício Comercial Brookfield Century Plaza (<http://www.br.brookfield.com/>).

O escopo deste artigo consiste em apresentar os procedimentos e boas práticas de engenharia para obter o melhor desempenho e qualidade destes grandes blocos concebidos em concreto de alta resistência, incluindo o desenvolvimento de um estudo de dosagem para obtenção do traço de concreto que melhor atendesse às especificações técnicas e de projeto, de uma simulação computacional eficiente para tratamento dos cálculos térmicos do calor de hidratação, bem como o estabelecimento de procedimentos de produção e aplicação do concreto e supervisão da execução em campo.

2. CONCEITO DE CONCRETO MASSA

Comparado ao concreto conhecido como “normal” ou “convencional”, o concreto massa possui uma peculiaridade em destaque que é a dificuldade de liberar o calor gerado pelas reações químicas exotérmicas de hidratação do cimento. A liberação do calor no interior da massa de concreto é influenciada pelas propriedades térmicas dos materiais empregados, pelas condições ambientais e pelas dimensões/geometria do elemento estrutural de concreto (ACI, 2005; Mehta e Monteiro, 2014; Isaia, 2011).

A hidratação do cimento Portland é uma reação exotérmica, que libera energia térmica no interior do concreto após sua aplicação. O calor liberado ao meio exterior é influenciado pelas

características térmicas dos materiais empregados, pelas condições ambientais e pelas dimensões da estrutura.

O concreto, através de seu coeficiente de dilatação térmica, também sofre variações dimensionais expansivas quando exposto à ação da temperatura decorrente desta reação química. Como ainda não está totalmente solidificado, expande quase livre e rapidamente, pois as reações exotérmicas principais, na maioria das vezes, ocorrem nas primeiras idades, a aproximadamente 50h-120h após a concretagem.

Ao resfriar-se à temperatura ambiente, o que ocorre de forma irregular e de fora para dentro criando gradientes térmicos importantes, fica sujeito a uma retração ou contração térmica. Esta retração, por conta das restrições naturais de atrito e engastamentos, induz o surgimento de tensões que podem superar as tensões resistentes de tração do concreto, provocando a fissuração de origem térmica da estrutura (ACI, 2005; Furnas, 2007).

Nesse aspecto, entende-se que para a concepção de elementos estruturais envolvendo concreto massa, como os blocos de fundação deste artigo, são necessários cuidados especiais, no que tange ao estudo de dosagem racional do concreto [por exemplo, com o menor consumo de cimento (clínquer) possível, informando a necessidade ou não do uso de gelo e materiais suplementares como escória, cinza volante e metacaulim], a simulação térmica eficiente (capaz de informar a necessidade ou não de concretagens em mais de uma camada, bem como fornecer subsídios para elaboração de um plano detalhado de concretagem), o procedimento executivo apropriado (capaz de fornecer diretrizes para controle da temperatura máxima de lançamento do concreto e outras particularidades) e ainda o acompanhamento técnico especializado dos eventos de concretagem, a fim de minimizar potenciais manifestações patológicas futuras.

3. ESTUDO DE DOSAGEM DO CONCRETO

O traço de concreto para este objetivo foi desenvolvido através de extensos estudos de laboratório e de campo. As proporções da mistura foram baseadas nas diretrizes do método de dosagem do IBRACON (Tutikian e Helene, 2011), nos insumos disponíveis na região, nas particularidades de campo e em conformidade com os requisitos da ABNT NBR 12655: 2006 (ABNT, 2006) e do ACI 237R-07 (ACI, 2007), bem como as especificações do projeto estrutural, orientado por dois parâmetros:

- Um bloco de concreto de 70 MPa (10,000psi) e cerca de 2,400m³ (3,000yd³) ficará sujeito a elevadas temperaturas durante sua aplicação, sendo necessário projetar um concreto capaz de reduzir o calor de hidratação a um valor mínimo;
- Após analisar os projetos estruturais e descobrir que a disposição de armaduras em alguns locais era bastante densa, será necessário também escolher um método de aplicação capaz de evitar anomalias, como falhas, vazios ou ninhos de concretagem.

Por estas razões, decidiu-se por substituir toda a água de amassamento por gelo e usar CP III-40 e adição de metacaulim no traço de concreto (com o intuito de reduzir o calor de hidratação), bem como empregar concreto autoadensável para facilitar o lançamento e evitar falhas de concretagem, pois há dificuldade de vibração.

O traço de concreto foi elaborado em um laboratório na cidade de São Paulo. Diferentes traços foram desenvolvidos, com distintas proporções de argamassa (Figura 2). Para cada traço candidato, as propriedades do concreto no estado fresco, como o conteúdo de ar aprisionado, massa específica e espalhamento (*slump-flow*) foram aferidos, e corpos de prova foram moldados, para serem ensaiados aos 3, 7 e 28 dias, com o objetivo de verificar a resistência à compressão, como apresentam as Figuras 3 e 4, a seguir.



Figura 2. Estudos de dosagem com diferentes teores de argamassa.



Figura 3. Aferição do ar aprisionado e da massa específica.



Figura 4. Espalhamento (*slump-flow*) e corpos de prova sendo moldados para os ensaios de resistência à compressão.

O traço final que atendeu às características desejadas foi obtido pelas proporções de materiais expostas na Tabela 1.

Tabela 1. Traço de concreto autoadensável para aplicação nos blocos de fundação do Edifício Comercial Brookfield Century Plaza.

$f_{ck} \geq 70$ MPa (10,000psi) e relação água/aglomerante = 0.36	
Cimento (CP III 40 Mizú)	447kg (313kg de escória + 134kg de clínquer)
Metacaulim HP	38kg
Areia artificial (pó de pedra)	481kg
Areia quartzosa natural	321kg
Brita 9-19mm	194kg
Brita 19-25mm	777kg
Água total (gelo + umidade dos agregados)	175L
Sikament 735 Aditivo polifuncional (0.5%)	2.2L
Sika 5700 Aditivo superplastificante (1%)	4.6L

4. ESTUDO TÉRMICO

O estudo térmico foi desenvolvido com o programa *b4cast 3.0*, que emprega o método da maturidade (calculado pela equação de Arrhenius), como descreve a ASTM C 1074-04 (ASTM, 2004). Este programa baseia-se no Método dos Elementos Finitos, sendo capaz de simular o histórico de evolução das temperaturas e das tensões oriundas das diferenças de temperatura no interior do elemento. Para estimar a tensão de tração, a Equação (1) foi empregada, como prescrito na normalização brasileira.

$$f_{ct,m} = 0,3 f_{ck}^{2/3} \quad (1)$$

Várias simulações foram realizadas, explorando diferentes estratégias de concretagem. A Construtora desejava investigar a possibilidade de concretar todo o bloco em apenas uma ou duas camadas, o que provou ser não recomendado, visto que as tensões internas de tração seriam maiores que resistência à tração de concreto. Como resultado das simulações considerando uma ou duas camadas, decidiu-se por investigar o comportamento das temperaturas e tensões numa concretagem do bloco em quatro camadas, cada uma com 1.125m de altura, com um intervalo de três dias entre os eventos. A temperatura de pico, de 64,6°, diminuiu para 54°C (redução de aproximadamente 20%). Também diminuíram as tensões de tração, as quais ficaram muito próximas à evolução da resistência à tração, resultando na baixa possibilidade de fissuras de origem térmica (Figura 5).

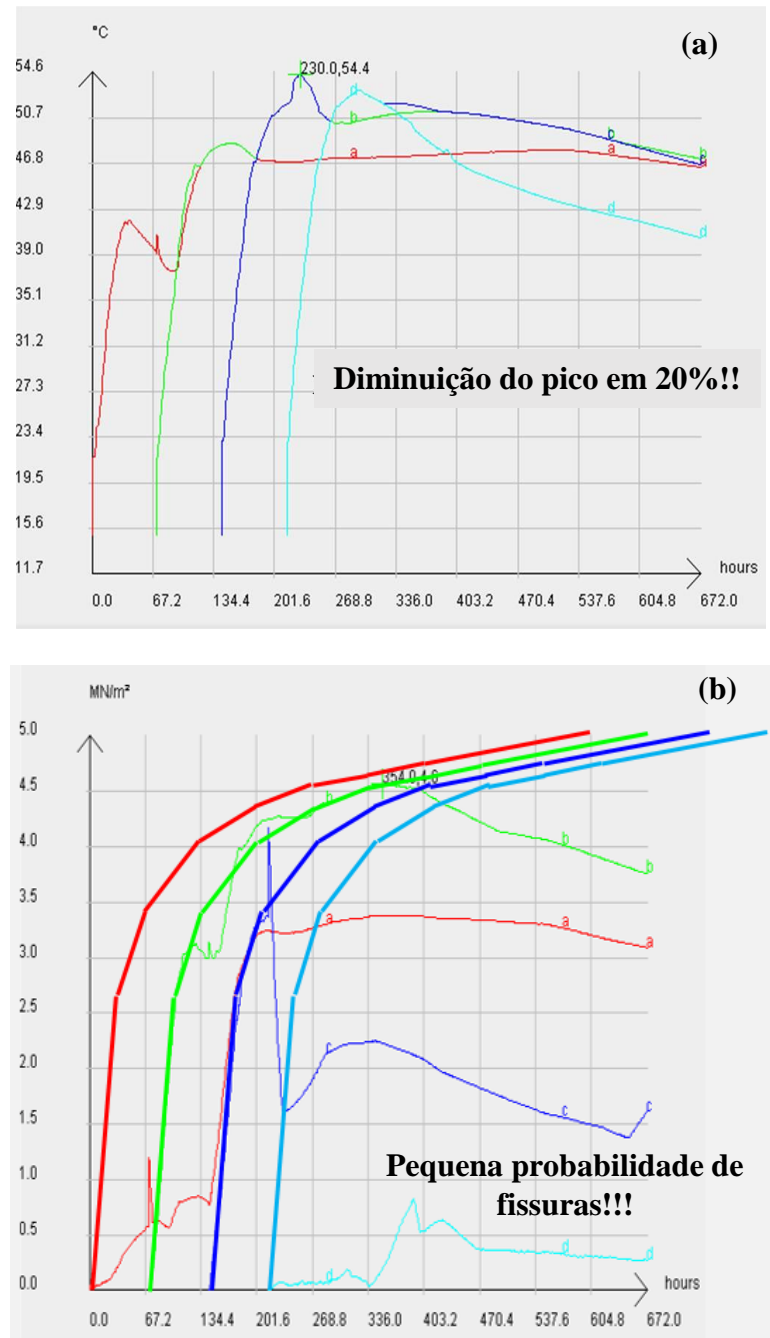


Figura 5. Concretagem do bloco em quatro camadas de 1,125m de altura e intervalo de três dias entre eventos de concretagem: (a) temperaturas e (b) tensões térmicas vs. resistência à tração.

5. PRODUÇÃO DO CONCRETO E PROCEDIMENTOS EXECUTIVOS

Os procedimentos recomendados para a concretagem dos blocos de fundação foram baseados nas disposições da normalização vigente (ABNT, 2004; ACI, 2010) e nas boas práticas de engenharia (Kosmatka e Wilson, 2011; Kennedy, 2005).

Para garantir que a produção e a aplicação do concreto na obra cumpriram com as normas de qualidade e as características especificadas, procedimentos executivos específicos (Tabela 2)

foram estabelecidos, os quais deveriam ser adotados pela Empresa de Serviços de Concretagem, pela Construtora e pelo Laboratório de Controle Tecnológico.

Tabela 2. Procedimentos de produção e aplicação do concreto.

Controle proposto e intervenientes	Procedimentos
Controle de produção do concreto na central Responsáveis: Empresa de Serviços de Concretagem e Laboratório de Controle Tecnológico	<ul style="list-style-type: none"> • Realizar aspersão de água no agregado graúdo; • Medir as temperaturas dos agregados e do cimento, sendo inferiores a 15°C (para os agregados) e 70°C (para o cimento); • Substituir toda a água de amassamento por gelo; • Pesar os sacos de gelo para determinar seu peso médio; • Aferir a umidade da areia; • Misturar e transportar apenas 6m³ em cada caminhão betoneira, sendo os aditivos dosados na central; • Estabelecer um fluxo constante de caminhões betoneira.
Controle da concretagem <i>in loco</i> Responsável: Laboratório de Controle Tecnológico	<ul style="list-style-type: none"> • A temperatura do concreto deveria ser medida e controlada, sendo $\leq 20^{\circ}\text{C}$; • O <i>slump-flow</i> deveria ser medido; • Corpos de prova deveriam ser moldados para ensaios de resistência à compressão; • A temperatura de cada camada de concretagem deveria ser aferida em pontos e momentos previamente definidos, através de termopares.
Procedimentos de concretagem Responsável: Construtora	<ul style="list-style-type: none"> • Execução das fôrmas e armaduras <i>in loco</i>, limpeza da camada inferior de concretagem, rebaixamento do lençol freático, drenagem de águas pluviais; • Provisão das bombas de concreto (três); • Preparação da face do concreto entre camadas para evitar “juntas frias”; • Cura do concreto e limpeza das superfícies.

É muito importante ressaltar o fato de que, para que o concreto ingressasse à obra com temperaturas inferiores a 20°C, um restrito e periódico controle da umidade da areia e da massa real dos sacos de gelo carregados em cada caminhão betoneira teve de ser rigorosamente conduzido.

Visto que, no Brasil, o gelo geralmente é vendido em sacos de massa nominal de 20kg, a massa média de um saco teve de ser aferida com frequência, para garantir que a quantidade especificada previamente de água estava efetivamente sendo adicionada à mistura.

6. SUPERVISÃO TÉCNICA EM CAMPO

A produção do concreto e os procedimentos de concretagem foram supervisionados, com o intuito de garantir que as recomendações fossem cumpridas e também para corrigir quaisquer desvios que pudessem ocorrer ou dar o suporte necessário em ocasiões específicas.

6.1. Supervisão na central de concreto

Na central de concreto da Empresa de Serviços de Concretagem, situada a cerca de 20min da obra, as temperaturas do cimento e dos agregados foram verificadas em diferentes oportunidades durante o dia. A temperatura do cimento nunca ultrapassou os 50°C. Procedeu-se com aspersão de água sobre os agregados (Figura 6), pois durante as tardes a temperatura ambiente chegava a mais de 30°C. A aspersão de água manteve a temperatura dos agregados inferior a 25°C (Figura 7).



Figura 6. Aspersão de água nos agregados graúdos na central de concreto.



Figura 7. Registro da temperatura dos agregados graúdos antes e após a aspersão de água na central de concreto.

A quantidade de sacos de gelo foi determinada através da aferição da umidade da areia e, então, calculada a massa média dos sacos de gelo. Com o incremento de temperatura durante o dia, o gelo poderia derreter mais rapidamente, forçando novas medidas.

Uma plataforma móvel foi instalada na traseira do caminhão de gelo e a quantidade determinada de sacos de gelo foi provida no caminhão betoneira. Um técnico do Laboratório de Controle Tecnológico verificou o número de sacos carregados por caminhão.

6.2. Supervisão na obra – Temperatura e *slump-flow* do concreto

Com a chegada do concreto à obra, sua temperatura foi devidamente controlada. Caso superior a 20°C, o concreto era rejeitado. A temperatura média dos eventos de concretagem foi inferior a 18°C (Figura 8).



Figura 8. A temperatura do concreto fresco foi controlada para cada caminhão betoneira através da imersão de um termômetro digital (exemplo: 13.2°C).

Caso a temperatura do concreto estivesse de acordo com a especificação, o espalhamento (*slump-flow*) do concreto era medido, devendo apresentar valores entre 600mm e 750mm. Além disso, como condicionante para a aceitação do concreto, o mesmo não poderia apresentar segregação. O *slump-flow* deveria ser a média de três diferentes medidas do diâmetro, e foi verificado pelo Laboratório de Controle Tecnológico (Figura 9).



Figura 9. Aferição do espalhamento (*slump-flow*) do concreto.

6.3. Supervisão na obra – Histórico de temperatura do concreto endurecido

Para registrar a temperatura do concreto endurecido, 12 termopares foram instalados pelo Laboratório de Controle Tecnológico, em três pontos e à meia altura de cada camada de concretagem. Os intervalos de tempo em que a temperatura deveria ser registrada também foram informados. Esses resultados foram guardados para posterior análise e calibragem do modelo térmico.

6.4. Supervisão na obra – Posicionamento das bombas de concreto e procedimento de concretagem

O posicionamento das bombas de concreto e a sequência de concretagem foi discutida juntamente com a equipe técnica da Construtora. Três bombas foram utilizadas (Figura 10). O concreto deveria ser lançado em subcamadas uniformes, com aproximadamente 0,3m de altura, iniciando ao lado da entrada com a bomba n°.1 e prosseguindo para os fundos com as bombas n°. 2 e 3.



Figura 10. Vista geral – Posicionamento das bombas de concreto.

A sequência de concretagem descrita foi empregada para todas as camadas. As duas primeiras foram concretadas antes da execução da armação superior (Figura 11a). Após a finalização de cada camada, a superfície foi preparada para apresentar a rugosidade necessária para promover uma melhor aderência com a camada subsequente. A cura do concreto iniciou imediatamente após o endurecimento, pela criação de uma lamina de água sobre a superfície. Previamente à concretagem, a superfície foi drenada e limpa com jatos de água. O concreto foi lançado sobre uma superfície saturada. Após a execução da segunda camada, a armação superior dos blocos e dos pilares foi posicionada, e o concreto foi aplicado com o auxílio de tremonhas (Figuras 11b e 12).



Figura 11. (a) Concretagem da segunda camada sem a armação superior e (b) aplicação do concreto após a montagem de todas as armaduras.



Figura 12. A armação superior consistia de duas camadas duplas de barras de 32mm de diâmetro. O concreto autoadensável foi concebido para atravessar esta malha tanto a superior como a do fundo do bloco que era ainda mais concentrada.

7. RESULTADOS

7.1 Controle tecnológico

Com relação ao controle tecnológico da resistência à compressão do concreto, ensaios foram realizados por amostragem total (100% dos caminhões betoneira) nas idades de 7, 28 e 63 dias. A maioria dos resultados foi de encontro aos requisitos de resistência à compressão ($f_{ck} \geq 70$ MPa) e demais especificações de projeto. Os resultados de resistência à compressão aos 28 dias de uma das

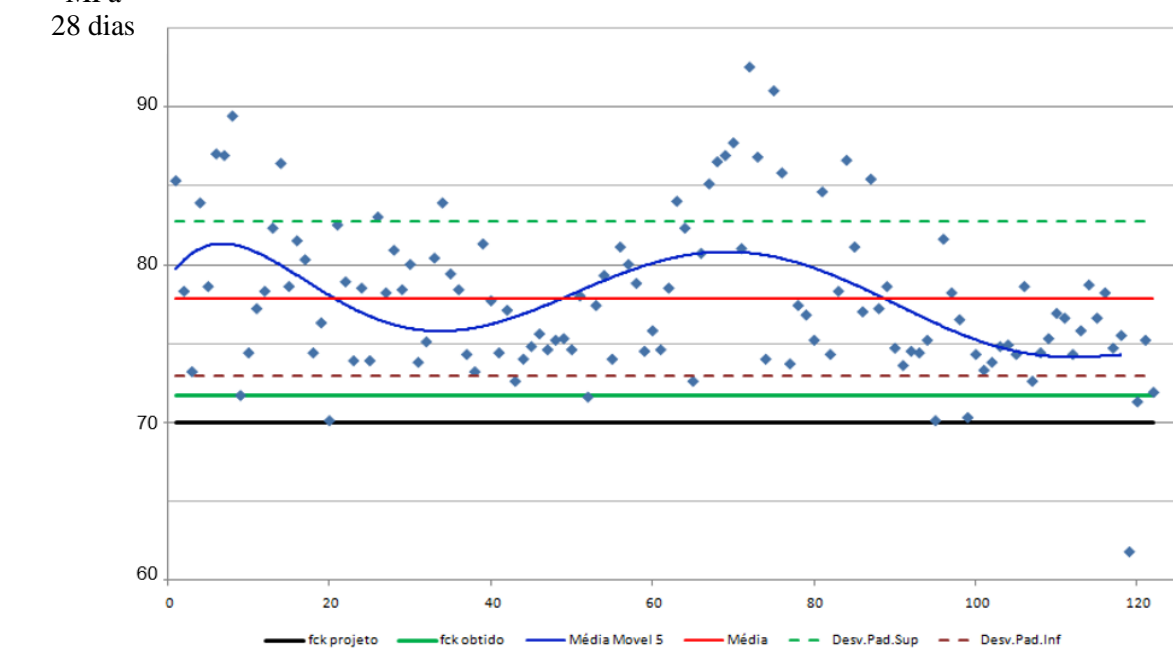


Figura 13. Exemplo de resultados de resistência à compressão do concreto de uma das camadas. Média móvel a cada 3 betonadas.

Além disso, o concreto autoadensável demonstrou um excelente desempenho em campo, acelerando a concretagem: o tempo médio necessário para bombear um caminhão de $6m^3$ foi de 15 minutos (incluindo os ensaios de aceitação), e não houve necessidade de vibração (adensamento).

7.2 Temperaturas aferidas no interior dos blocos de fundação

As temperaturas reais no concreto foram registradas. O pico de temperatura, 57°C, foi alcançado na quarta camada após 582h do início da concretagem. Como se percebe no gráfico, o intervalo de tempo entre concretagens foi alterado *in loco* para melhor se adequar à execução. Ao invés de 3, 3 e 3 dias de intervalo, 3, 10 e 2 foram empregados, o que levou a diferenças de temperatura inferiores a 10% (Figura 15).

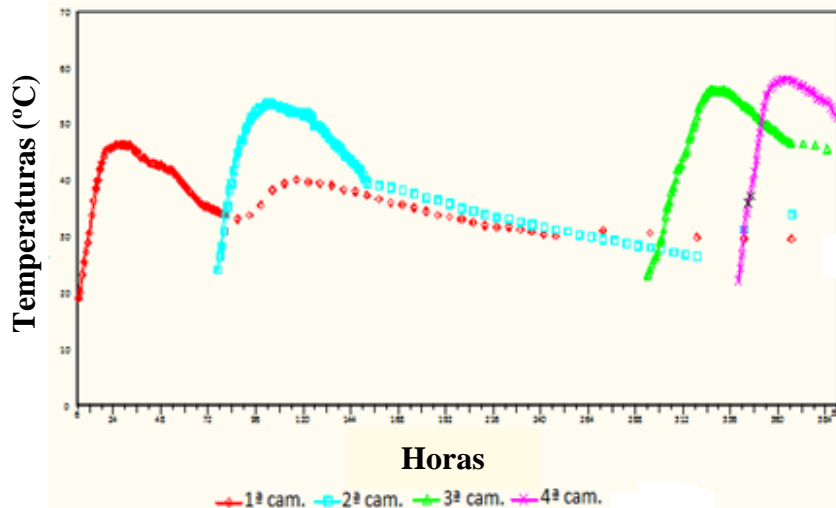


Figura 15. Temperaturas resultantes do calor de hidratação do cimento, conforme registradas em campo. Intervalos de 3, 10 e 2 dias.

8. CONCLUSÕES

Este artigo teve como objetivo demonstrar que o desenvolvimento prévio de estudos de laboratório de traços de concreto e de simulações térmicas computacionais, bem como a proposição de procedimentos executivos rigorosos e, em especial, o controle e supervisão técnica de eventos de concretagem em campo, foram fatores determinantes para promover um elemento estrutural com integridade e em conformidade com as especificações do projeto, sem fissuras.

Assim, como uma menção final, observou-se que as premissas observadas neste artigo, tanto teóricas (antes da concretagem) quanto práticas (durante e após a concretagem), possibilitaram um resultado satisfatório, revelando serem poderosas ferramentas para planejamento e execução de estruturas de concreto desafiadoras e tecnicamente complexas, como as que envolvem concreto massa.

9. AGRADECIMENTOS

Os autores reconhecem e apreciam o apoio e colaboração das empresas envolvidas neste caso, como segue: Brookfield S.A. (Construtora), Polimix Concreto Ltda. (Empresa de Serviços de Concretagem), Pasqua & Graziano Consultores, Concepção Estrutural e Projetos (Projetista Estrutural) e Falcão Bauer (Laboratório de Controle de Qualidade do Concreto).

10. REFERÊNCIAS

American Concrete Institute (2005), “ACI 207.1R-05: Guide to Mass Concrete”, (Farmington Hills, U.S.: ACI).

- American Concrete Institute (2007), “*ACI 237R-07: Self-Consolidating Concrete*”, (Farmington Hills, U.S.: ACI).
- American Concrete Institute (2010), “*ACI 301-10: Specifications for Structural Concrete*”, (Farmington Hills, U.S.: ACI).
- American Society for Testing and Materials (2011), “*ASTM-C 1074: Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method*”, (West Conshohocken, U.S.: ASTM International).
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2006), “*NBR 12655: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento*”, (Rio de Janeiro, Brazil: ABNT).
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004), “*NBR 14931: Execução de estruturas de concreto – Procedimento*”, (Rio de Janeiro, Brazil: ABNT).
- Furnas. Laboratório de Concreto; Andrade, W. P. (Ed.). (1997), “*Concretos: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo – ensaios e propriedades*”, (São Paulo, Brazil: PINI). 1v.
- Isaia, G. C. (Ed.). (2011), “*Concreto: Ciência e tecnologia*”, (São Paulo, Brazil: IBRACON). 2v.
- Kennedy, Lindsay K. (Ed.). (2005), “*The Contractor's Guide to Quality Concrete Construction*”, (St. Louis, U.S.: American Society of Concrete Contractors – ASCC). 3ed.
- Kosmatka, Steven H., Wilson, Michelle L. (2011), “Design and control of concrete mixtures”, (Illinois, U.S.: Portland Cement Association – PCA). 15ed.
- Mehta, P. K., Monteiro, J. M. (2014), “*Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*”, (São Paulo, Brazil: IBRACON). 2ed.
- Tutikian, B., Helene, P. (2011), “*Dosagem dos Concretos de Cimento Portland*”. In: Geraldo C. Isaia. (Org.). “*Concreto: Ciência e Tecnologia*”, 1 ed. São Paulo: Ibracon, v. 1, p. 415-451.