



Plano de execução da sapata do edifício Faria Lima Plaza

Concreting plan of the foundation of Faria Lima Plaza Building

Eduardo Funahashi Jr. (1); Selmo Kuperman (2); Grazielle Vicente (3); Francisco Graziano (4); Sérgio Mendes (5); Rodrigo Napolitano (6);

(1) Engenheiro Civil, Deseq Ltda., eduardo.funahashi@deseq.com.br,

(2) Engenheiro Civil, Deseq Ltda., selmo@deseq.com.br,

(3) Engenheira Civil, grazielle.vicente@deseq.com.br

(4) Engenheiro Civil, Pasqua&Graziano Associados, graziano@pasquaegraziano.com.br

(5) Engenheiro Civil, Fonseca & Mercadante, sergio.mendes@fonsecamercadante.com.br

(6) Engenheiro Civil, Fonseca & Mercadante, rodrigo.napolitano@fonsecamercadante.com.br

Resumo

Durante a execução do concreto massa de elevada resistência há necessidade de cuidados especiais para evitar fissuras devido à elevação da temperatura interna do concreto quando da hidratação do cimento. Este trabalho apresenta o plano de execução da sapata do empreendimento Faria Lima Plaza em São Paulo, SP, com volume de concreto igual a 1400 m³, $f_{ck}=45\text{MPa}$ e $E_{cs}=31\text{GPa}$ aos 28 dias. A definição da sua execução em etapas baseou-se em estudos preliminares dos traços de concreto e simulações térmicas focando na redução do consumo de cimento e do nível de refrigeração na sua execução. Para a definição das temperaturas de lançamento do concreto empregou-se um modelo tridimensional de elementos finitos. A sua execução foi realizada com segmentos de menor volume e altura através da previsão de juntas de construção verticais e horizontais. As temperaturas desenvolvidas na estrutura foram monitoradas através de termopares instalados no seu interior. Os estudos térmicos auxiliaram na definição da metodologia executiva da sapata para as condições logísticas da obra, na escolha do traço de concreto com redução dos consumos de cimento e gelo, resultando em menor emissão de CO₂ na atmosfera, além de minimizar a formação de DEF-etringita tardia e/ou a fissuração de origem térmica garantindo a sua maior durabilidade no tempo.

Palavra-Chave: concreto massa, plano de concretagem, elevada resistência, estudo térmico

Abstract

During the construction of mass concrete there is need for special care to avoid cracks due to the lack of control related to the internal temperature rise during cement hydration. This work presents the concreting plan of the foundation structure of Faria Lima Plaza building in São Paulo, SP. The foundation block with a volume of 1400 m³ was specified with $f_{ck} = 45\text{MPa}$ and $E_{cs} = 31\text{GPa}$ at 28 days. The concreting plan was based on preliminary studies of the concrete mix that lead to thermal simulations, focusing in reducing the cement content and defining the values for concrete cooling. In order to fix concrete placement temperatures a three-dimensional finite element model was used. This huge block was divided in parts with smaller volumes and height by the introduction of vertical and horizontal construction joints. The temperatures developed in the mass concrete were monitored using embedded thermocouples. The thermal studies helped to define the construction methodology adapted to the logistics conditions, defining the best concrete mix with lower cement and ice content, resulting in lower CO₂ emissions and reducing the risk of cracking either by thermal tensile stresses or eventually through delayed ettringite formation (DEF), thus ensuring greater durability of the concrete structure.

Keywords: mass concrete, execution plan concrete, high compressive strength, thermal-stress study

1 Introdução

O edifício Faria Lima Plaza, construído pela Fonseca & Mercadante na cidade de São Paulo, possui área do terreno de 40.000m², aproximadamente, e está localizado ao lado do Largo da Batata na R. Teodoro Sampaio 2700 e em frente à estação de metrô Faria Lima (Linha 4). O empreendimento foi projetado com 22 andares e altura total de 110 m, aproximadamente, com 6 pisos de estacionamento subterrâneo com mais de 1200 vagas. O Projeto Estrutural foi desenvolvido pelo escritório Pasqua & Graziano Associados e recebeu a classificação AAA (triple A), que se refere ao que há de melhor na categoria de empreendimentos corporativos na atualidade, representando o topo da escala do NRE-POLI de classificação da qualidade de edifícios, compreendendo que se trata de um projeto moderno, inovador e com alta eficiência tanto tecnológica quanto energética. O Faria Lima Plaza obteve a pré-certificação LEED Gold concedida pelo US Green Building Council que fomenta a criação de edifícios sustentáveis, eficientes e econômicos. O Projeto Arquitetônico foi realizado pelo escritório Kohn Pedersen Fox Associates (KPF), referência mundial em projetos de arranha-céus. A edificação possui uma característica diferenciada devido a existência de pilares inclinados ao longo de toda a sua altura e que mudam de direção, como mostra a Figura 1.

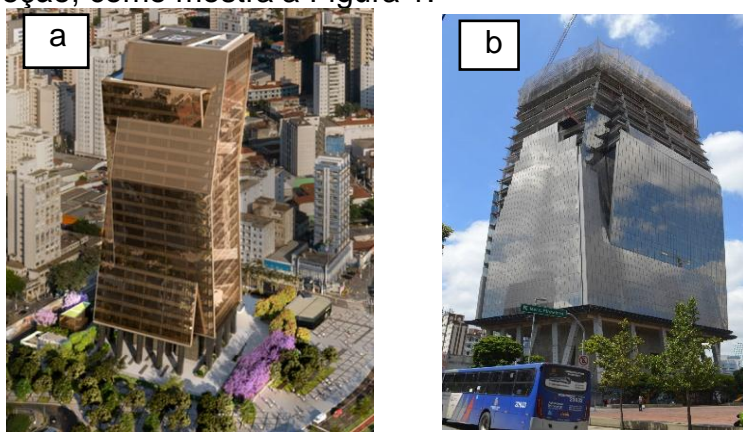


Figura 1 - (a) Projeto arquitetônico (fonte: www.farialimaplaza.com.br) e (b) Vista geral do edifício Faria Lima Plaza (arquivo da Deseq, novembro de 2020)

Devido às características do projeto a sapata com altura de 3m e volume de concreto de 1400 m³, aproximadamente, resistência característica de projeto igual a 45 MPa e módulo de elasticidade secante de 31 GPa aos 28 dias, foram realizados estudos térmicos com a finalidade de minimizar eventual fissuração de origem térmica e formação de etringita tardia (DEF) devido a elevação da temperatura interna do concreto após o seu lançamento.

Considerando as dificuldades logísticas envolvidas para a montagem da sua armação e lançamento do concreto em única etapa, a sua execução foi segmentada em partes de menor volume e altura, prevendo juntas verticais e horizontais entre as diferentes etapas de concretagem. Os estudos térmicos realizados ainda na fase de projeto auxiliaram na definição da metodologia executiva e do traço de concreto com redução do consumo de cimento e menor risco de fissuração.



2 Concreto Massa

Concreto massa é definido como qualquer volume de concreto com dimensões grandes suficientes para que sejam requeridas medidas especiais para minimizar fissuras devido a geração de calor da hidratação do cimento e respectiva mudança do seu volume quando da sua dissipação para o meio ambiente. Dependendo do comportamento térmico da estrutura e da intensidade do quadro fissuratório pode vir a ocorrer perda de sua integridade estrutural e de sua monoliticidade, além de diminuir a durabilidade do concreto. Este tipo de concreto não se limita apenas a estruturas com grandes volumes como àquelas relacionadas a obras de infraestrutura, como barragens, por exemplo, devendo ser considerados também blocos de fundação e sapatas, vigas, pilares, lajes, estacas, tubulões, entre outros. Para estruturas de concreto massa é fundamental avaliar, através de análises térmicas, ainda na fase de projeto, o seu risco potencial de fissuração com as dosagens de concreto a serem empregadas de forma a auxiliar a definição da metodologia executiva a ser adotada. Nos grandes centros urbanos tem sido projetados edifícios cada vez mais esbeltos com elementos de fundação com elevadas resistências variando de 40 MPa até 65 MPa, por exemplo, que mesmo com menor volume (inferior a 30m³, por exemplo) resultam em elevado risco de fissuração dependendo das suas dimensões, dosagem e materiais constituintes do concreto, condições ambientais da obra e técnicas empregadas para sua execução. Devido às altas temperaturas desenvolvidas no interior do concreto massa durante a hidratação do cimento, quase adiabáticas dependendo da altura da estrutura, podem resultar elevados gradientes térmicos entre a região próxima ao centro geométrico da estrutura (maior acúmulo de calor) e as suas regiões periféricas induzindo tensões térmicas que, caso sejam superiores a resistência à tração do concreto, resultam em fissuras de origem térmica. As elevadas temperaturas internas do concreto representam um risco significativo de fissuração devido à formação de etringita tardia (DEF). A DEF é uma forma de ataque de sulfato interno que pode ser causada quando a temperatura do concreto exceder 65°C, dependendo da composição físico-química do cimento, adições pozolânicas empregadas e da presença de água ou umidade em contato com o concreto durante a sua vida útil.

Devido as análises estruturais de segurança relacionadas às limitações de fissuração constantes da NBR 6118 (2014) quando da verificação dos ELS e ELU em estruturas de concreto devido a deformações impostas, além da garantia da sua durabilidade através da limitação da sua abertura, as eventuais fissuras resultantes de efeitos térmicos tem sido relevantes nestas análises. Segundo KUPERMAN apud TECOMAT (2020) há uma necessidade premente em se evitar que a temperatura supere valores, por enquanto, especificados em 65°C. Isto até que surja uma metodologia de ensaio confiável e que possa indicar se o cimento empregado tem ou não condições de deflagrar a etringita tardia. Um dos pontos importantes diz respeito à necessidade de constar dos projetos, seja em plantas de formas ou em especificações, de limitações relativas às temperaturas atingidas pelos concretos com o intuito de evitar a formação deste tipo de manifestação patológica. Dependendo do tipo de estrutura e características das fissuras, estas muitas vezes resultam em despesas adicionais para análise das suas causas e consequências e, na maioria dos ANAIS DO JUBILEU DE OURO IBRACON – 2022



casos, implicam em serviços de recuperação com altos custos não previstos no orçamento da obra resultando em prejuízos financeiros, desconforto entre as partes envolvidas tanto no projeto quanto na execução, impactando negativamente no cronograma da obra.

3 Características de projeto e análise preliminar

A metodologia construtiva adotada para a execução da sapata do empreendimento Faria Lima Plaza foi baseada nos estudos preliminares do projeto através de interação direta com o Construtor (Obra), o Projetista Estrutural e o Tecnologista de Concreto de forma a adequar a metodologia executiva com as características específicas de logística para lançamento do concreto e avaliação da possibilidade de redução de custos relacionados a sua pré-refrigeração. O concreto da estrutura foi especificado com $f_{ck}=45$ MPa, $E_{cs} \geq 31$ GPa para tensão de 14MPa e relação água-cimento (a/c) $\leq 0,50$. Para definição do traço de concreto foram realizados estudos em laboratório para avaliação do seu desempenho no estado fresco e endurecido, sendo: a) um traço inicialmente proposto pela concreteira com base nas especificações de Projeto e b) um traço de concreto da concreteira previamente estudado em laboratório com ajuste do seu consumo de cimento através da substituição parcial do cimento por material pozzolânico e emprego de aditivos superplastificante. Após a avaliação preliminar dos traços de concreto foi possível reduzir o consumo de cimento em 67 kg/m^3 em relação ao traço inicialmente proposto, diminuindo assim o risco de fissuração de origem térmica. Devido às condições logísticas da obra considerou-se a execução da estrutura de 1400 m^3 em volumes diários de até 150 m^3 , aproximadamente, por etapa de concretagem, prevendo juntas de construção horizontais entre as camadas de concretagem com altura igual a 1,5m, cada, além de 10 juntas verticais (preenchidas posteriormente com concreto de retração compensada com aditivo a base de óxido de cálcio). Com base na dosagem de concreto a ser empregada e nos cálculos térmicos realizados através de modelagem matemática em 3D pelo método dos elementos finitos foram definidos os procedimentos construtivos considerando intervalo de lançamento de 10 dias entre as etapas construtivas com altura de camada (AC) igual a 1,5 m, cada. As figuras 2 e 3 mostram desenhos, em planta da sapata, considerados para sua execução.

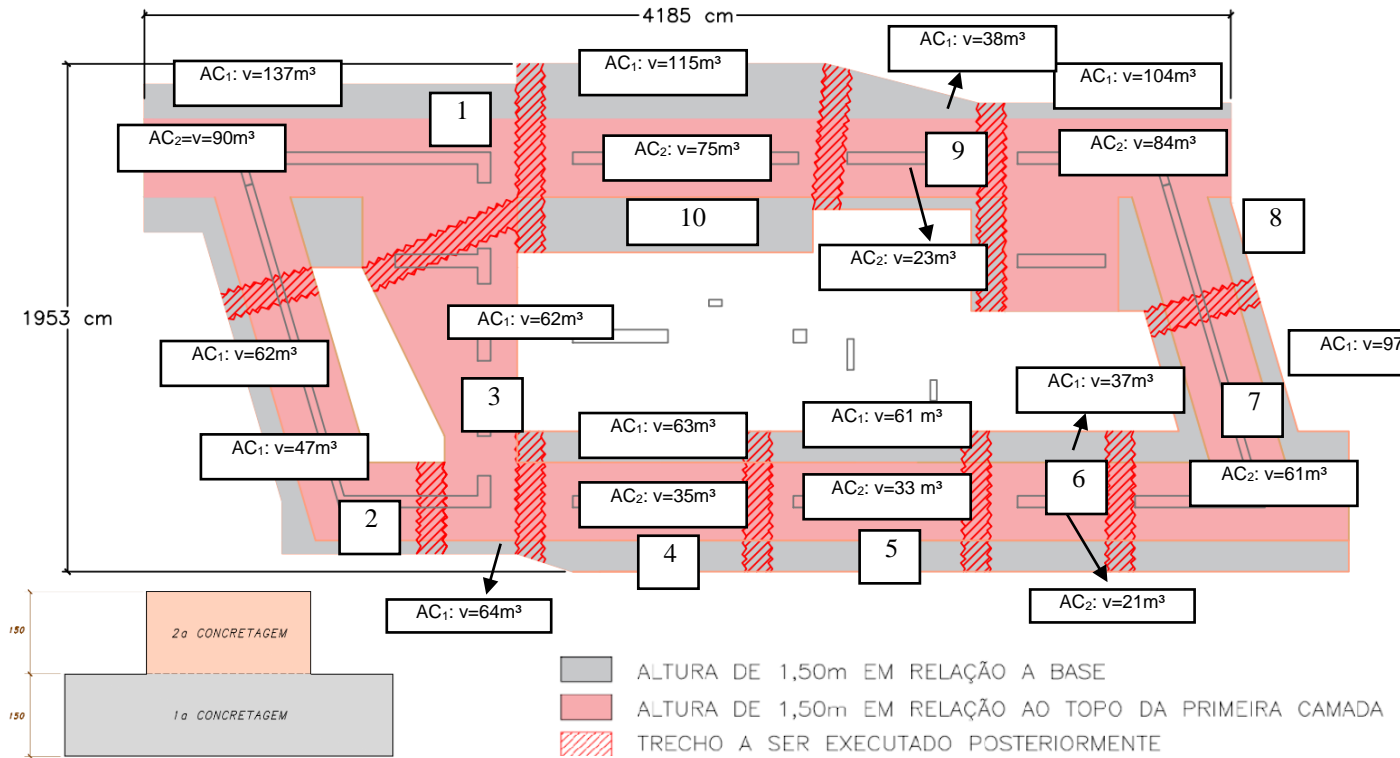


Figura 2 – Detalhe da planta da sapata com indicação da sua divisão em etapas de menor volume (< 150 m³) e altura (AC=1,5m) – Notar a previsão de juntas verticais (trecho a ser executado posteriormente) para lançamento do concreto com retração compensada

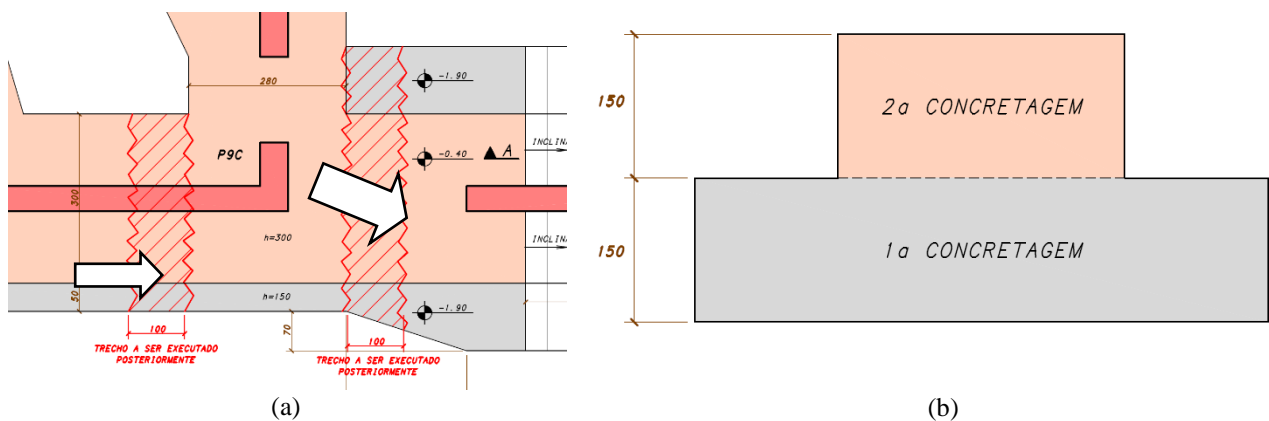


Figura 3 – (a) Detalhe do trecho a ser executado posteriormente com largura igual a 1 m (b) Corte esquemático para concretagem dos segmentos da sapata da obra Faria Lima Plaza

4 Estudo térmico para definição da metodologia construtiva

O segmento da estrutura escolhido para a realização do estudo térmico e apresentado no presente artigo é aquele com maior volume e maior área com restrição à sua movimentação (m^2) (faces laterais e de base em contato com o lastro ou camada de concretagem) e, portanto, com maior probabilidade de fissuração (figura 4). Os resultados deste cálculo foram adotados para os demais segmentos da sapata. O segmento analisado possui cerca de 14,4 m de comprimento, 8 m de largura e altura de 1,5 m, com um volume de $137 m^3$, aproximadamente. A segunda etapa deste segmento de mesma altura e menor área de base possui volume igual a $90m^3$, totalizando $227m^3$, conforme mostra a figura 3.

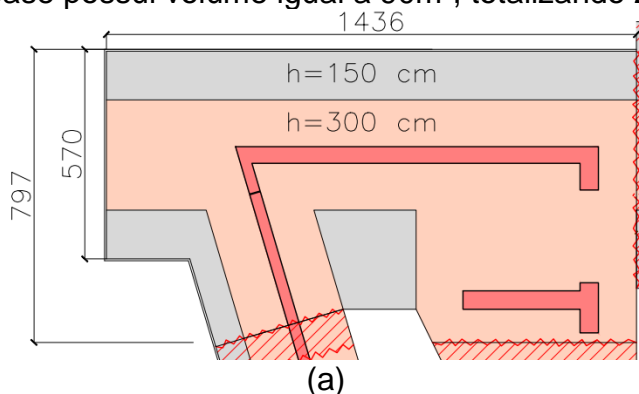


Figura 4 – (a) Planta do segmento da sapata adotado para realização dos estudos térmicos

Na fase de projeto foi realizado estudo térmico para definição da metodologia executiva considerando o traço de concreto inicialmente proposto com elevado consumo de cimento e igual a $411 kg/m^3$ (dosagem nomeada T411) que resultou em maior risco de fissuração considerando a sua elevação adiabática teórica igual a $57^{\circ}C$. Com base nos resultados de resistência à compressão deste traço de concreto realizados em laboratório foi possível reduzir o consumo de cimento para $344 kg/m^3$ (dosagem nomeada T344).

O ajuste do consumo de cimento resultou em menor elevação adiabática teórica ($47,6^{\circ}C$), ou seja, uma redução de $9,6^{\circ}C$ em relação a elevação adiabática estimada para a dosagem T411. A divisão da estrutura em etapas com camadas de concretagem de menor altura, diminuição do volume de concreto e redução do consumo de cimento reduziu as máximas temperaturas a serem atingidas no interior do concreto. A partir dos estudos térmicos foi possível adotar temperaturas de lançamento do concreto fresco mais liberais, durante o seu lançamento, minimizando mesmo assim a probabilidade de aparecimento de fissuras. Para o cálculo das temperaturas e tensões adotou-se um modelo tridimensional baseado no método dos elementos finitos (MEF) com a utilização do software b4cast versão 6.14. Fatores que integram o modelo matemático incluíram as características mecânicas do concreto, como resistências à compressão e à tração, módulo de elasticidade, e características térmicas do concreto como calor específico, condutividade térmica, coeficiente de dilatação térmica, entre outros. Além disso, foi fundamental adotar condições de contorno próximas as reais que a estrutura estaria submetida, como as condições ambientais locais (temperatura ambiente, velocidade do vento e radiação). Estas estimativas foram adotadas a partir de informações disponibilizadas por sites de clima. Além destes, as características relacionadas à execução, como temperatura e velocidade de lançamento do concreto fresco, tipo de fôrma, condições de cura, tipo de apoio, elementos ou estruturas em contato com a peça a ser executada, também foram considerados nas simulações matemáticas. Para análise térmica foi realizado estudo paramétrico

considerando três temperaturas de lançamento do concreto fresco, 15°C, 25°C e 35°C, para que fosse possível definir a temperatura que apresentasse o menor risco de fissuração. Para o segmento analisado foram consideradas duas etapas de concretagem de 1,5 m de altura, cada, conforme mostra a figura 3. A tabela 1 apresenta as dosagens e as propriedades térmicas e mecânicas dos traços de concreto estudados e a tabela 2 os resultados dos ensaios de calor de hidratação e estimativa da elevação adiabática para os traços T344 e T411, além dos resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade obtidos através das dosagens experimentais desenvolvidas em laboratório. Os valores de resistência à tração foram estimados com base na equação proposta na NBR 6118 (2014), assim como o valor de coeficiente de dilatação térmica do concreto. Com base na litologia dos agregados estimou-se o calor específico e condutividade térmica dos concretos.

Tabela 1 – Traços dos concretos estudados para execução da fundação do edifício Faria Lima Plaza

Material		T344	T411
Traço do concreto	Cimento CP II E 40 (kg/m ³)	344	411
	Areia natural média (kg/m ³)	356	341
	Areia artificial (kg/m ³)	459	439
	Brita 0 (kg/m ³)	223	211
	Brita 1 (kg/m ³)	896	845
	Aditivo Mid-range (kg/m ³)	2,1	2,5
	Água (kg/m ³)	173	185
	Massa específica (kg/m ³)	2453	2434

Tabela 2 – Propriedades térmicas e mecânicas adotadas para os concretos da sapata

Propriedades térmicas e mecânicas dos concretos		T344	T411	
Propriedades	Mecânicas	$f_{c1} - f_{c3} - f_{c7} - f_{c28}$ (MPa)	23– 37– 44– 59	26– 49– 60– 75
		$f_{ct1} - f_{ct3} - f_{ct7} - f_{ct28}$ (MPa)	2,4 – 3,3 – 3,7 – 4,5	2,6 – 4,0 – 4,6 – 5,3
		$E_{cs3} - E_{cs7} - E_{cs28}$ (GPa)	27– 30– 35	27– 30– 35
		Coeficiente de Poisson	0,21	0,21
	Térmicas	Calor específico (kJ/kg°C)	0,96	0,96
		Condutividade térmica (kJ/m.h.°C)	13,2	12,8
		Coeficiente de dilatação térmica	10x 10 ⁻⁶ /°C	

A partir dos consumos de cimento dos traços, do calor específico e da massa específica dos concretos, além dos dados de calor de hidratação atualizado do cimento e determinado pelo método da garrafa de Langavant, foi calculada a elevação adiabática destes concretos conforme consta da tabela 3.

Tabela 3 – Calor de hidratação e elevação adiabática calculados para os traços de concreto

Tempo	Calor de hidratação (J/g) (NBR 12006)	Elevação adiabática estimada (°C)	
	CP II E 40 (São Paulo, 2019)	Dosagem T344	Dosagem T411
6 horas	50	7,3	8,8
12 horas	226	33,1	39,8
24 horas	295	43,2	51,9
41 horas	316	46,2	55,6
7 dias	325	47,6	57,2
28 dias	325	47,6	57,2

Para avaliar o potencial risco de fissuração do concreto preliminarmente verificou-se que o rendimento térmico para estes concretos com este tipo de cimento é de $0,138 \text{ }^\circ\text{C}/\text{kg}/\text{m}^3$, ou seja, a cada $10\text{kg}/\text{m}^3$ de cimento é gerado um aumento de temperatura de $1,4^\circ\text{C}$, aproximadamente. O rendimento térmico ($R_T, \text{ }^\circ\text{C}/\text{kg}/\text{m}^3$) indica o potencial aumento da elevação adiabática de temperatura ($^\circ\text{C}$) em relação ao consumo de cimento ou aglomerante (kg/m^3) considerado nas dosagens o para o mesmo tipo de cimento e materiais constituintes do concreto. Por esta relação é possível verificar que quanto maior o consumo de cimento maior será elevação adiabática de temperatura do concreto. A determinação da curva de elevação adiabática poderá ser realizada através de método de ensaio constante da ABNT NBR 12819 (2012) e representa uma informação importante para as previsões de temperatura em concreto massa. Geralmente, a determinação da elevação adiabática é realizada na fase inicial de projetos de infraestrutura como barragens, parques eólicos, entre outros, sendo pouco realizado em obras residenciais e/ou industriais. Devido a questões logísticas de envio de amostras e existência de poucos laboratórios no Brasil que possuem este equipamento, este tipo de ensaio não foi realizado. Quando não há ensaios de elevação adiabática do concreto disponíveis esta poderá ser estimada em função do calor de hidratação do cimento ou aglomerante atualizados e seus respectivos consumos, massa específica e calor específico do concreto (FURNAS, 1997; BOFANG, 2014). É de suma importância ter conhecimento dos ensaios atualizados de calor de hidratação do cimento a ser empregado para estimativa do aumento de temperatura no interior do concreto. A determinação do calor de hidratação através do método da garrafa de Langavant em argamassas (calorímetro semiadiabático, preconizado pela ABNT NBR 12006:1990) tem sido realizado com maior frequência no Brasil. Ensaios realizados através de calorímetro isotérmico segundo o método da ASTM C1679 (2017), podem ser utilizados para avaliar o potencial calor de hidratação do cimento, no entanto, para serem utilizados como parâmetro em análises térmicas deve-se considerar a maturidade do concreto levando em conta que este ensaio é realizado em pastas e argamassas em ambiente a temperatura constante. Através de ensaios em calorímetros semi-adiabáticos como o Heat Box, por exemplo, pode ser estimado o calor de hidratação diretamente da amostra de concreto a ser utilizada através do conhecimento dos coeficientes de perda de calor do equipamento e software próprio para estas estimativas, conforme mostrados por FUNAHASHI (2018).

Para a modelagem matemática, a estrutura foi considerada apoiada diretamente sobre o lastro de concreto sobre o solo. Nas regiões laterais da estrutura e em contato com o solo lateral (“contra barranco”) foram utilizadas placas de isopor para reduzir as restrições laterais nesta região e minimizar eventuais fissuras quando da dissipação do calor do interior da estrutura para o ambiente. Nas juntas verticais de cada segmento foram instaladas telas de metal expandido para facilitar o corte para passagem das armaduras e garantir o tratamento adequado da junta de construção. A figura 5 mostra seção em planta com as características de contorno adotadas na simulação.

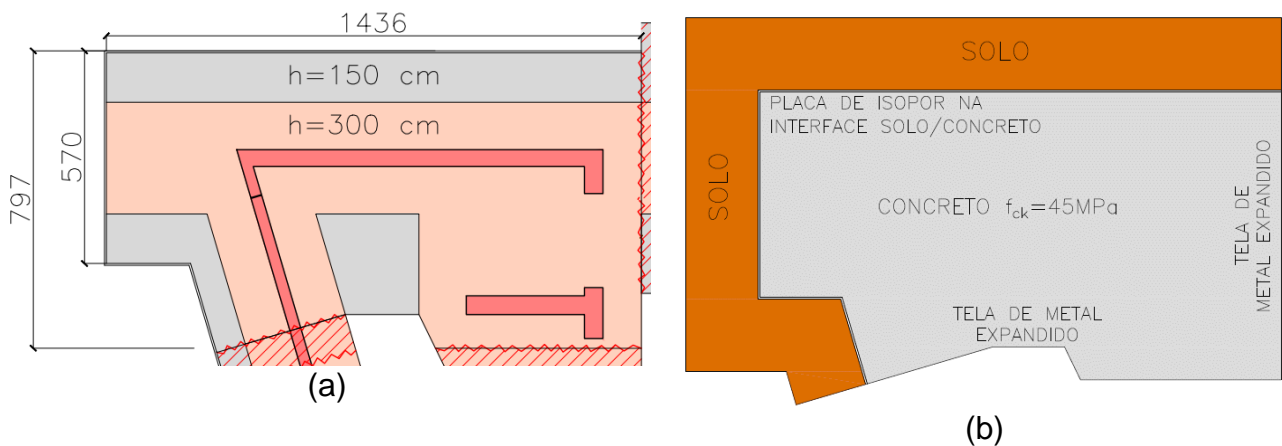


Figura 5 – Condições de contorno consideradas para a concretagem do segmento de boco

A tabela 4 apresenta as características térmicas e mecânicas adotadas para solo, lastro de concreto e isopor na interface entre o solo e o concreto recém-lançado.

Tabela 4 – Propriedades consideradas na simulação térmica para o solo, lastro de concreto e isopor

Características do elemento ⁽¹⁾	Solo	Lastro de concreto	Isopor
Massa específica (kg/m ³)	1800	2400	20
Calor específico (kJ/kg.°C)	1,00	0,94	1,30
Condutividade térmica (kJ/m. h.°C)	2,50	9,00	0,10
Módulo de elasticidade (MPa)	2000	15000	8000
Coefficiente de dilatação térmica (10 ⁻⁶ /°C)	9	10	100
Coefficiente de Poisson	0,30	0,20	0,20

Nota: (1) na região das juntas verticais considerou-se troca de calor diretamente pelo concreto devido às características das tela de metal expandido utilizada como fôrma.

A figura 6 apresenta a malha de elementos finitos 3D adotada para a análise e as isothermas geradas pelo software utilizado para os cálculos das temperaturas e tensões do elemento de concreto massa.

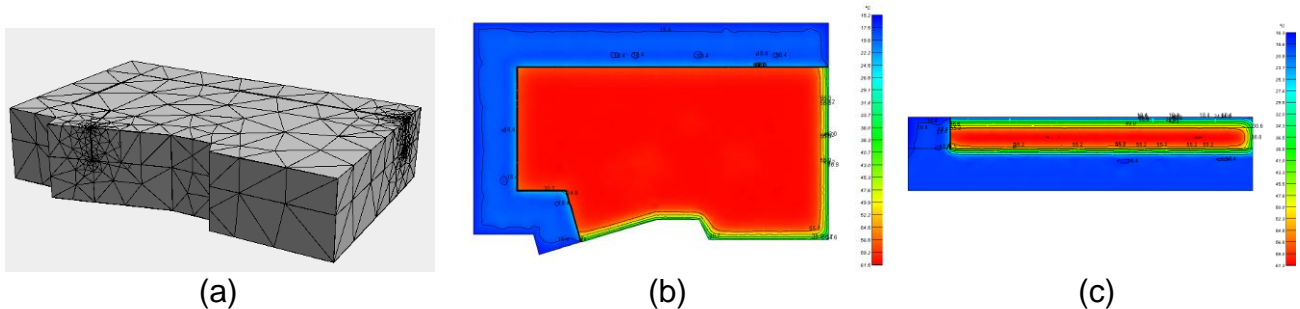


Figura 6 – (a) Malha de elementos finitos formada por elementos tetraédricos e gerada automaticamente pelo software; (b) Isotermas na seção em planta na altura média da estrutura e (c) isotermas na seção transversal após 26 horas do início do lançamento do concreto (temperatura de lançamento adotada no cálculo igual a 25°C)

Para a análise térmica-tensional foram avaliadas as regiões mais críticas da estrutura analisada e próximas da base e lateral em contato direto como o solo, além das região próxima ao centro geométrico da estrutura com maior acúmulo de calor devido a sua maior dificuldade de dissipação. Os pontos analisados foram escolhidos a partir das isotermas e isotensões calculadas pelo software. Com exceção do ponto D, em todos os outros pontos (A, B, C e E) foram instalados termopares para monitoramento da elevação da temperatura no interior do concreto ao longo do tempo.

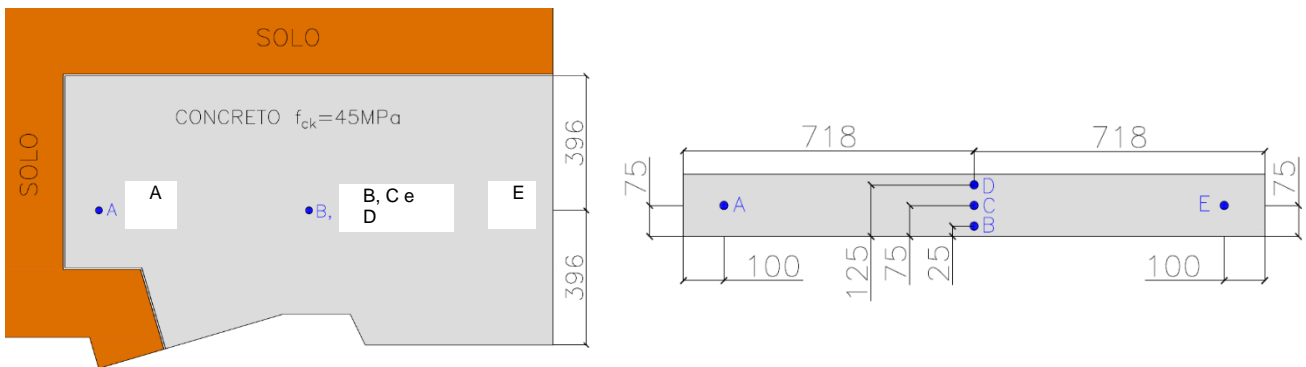


Figura 7 – Pontos de estudo e de instalação dos sensores térmicos no interior da estrutura de concreto (primeira etapa de concretagem)

A figura 8 apresenta os resultados das simulações térmicas (resumo das máximas temperaturas e tensões de origem térmica) considerando o traço de concreto T344. Através dos gráficos evidencia-se que quanto maior a temperatura de lançamento do concreto fresco maior é a temperatura máxima atingida pelo concreto e, conseqüentemente, maior é a tensão devido ao gradiente térmico no interior da estrutura. As temperaturas de lançamento do concreto fresco foram definidas a partir de simulações computacionais considerando a primeira etapa de concretagem com altura de 1,5 m e os dois traços de concreto (T344 e T411). A partir dos cálculos verificou-se a probabilidade de fissuração do concreto através da comparação das tensões térmicas desenvolvidas no interior do

segmento de concreto com a sua resistência à tração, considerando fator de segurança (FS) igual a 1,2, conforme mostrado na figura 8. Além disto, nesta figura consta a temperatura máxima de lançamento do concreto que evitaria o atingimento do limite de 65°C, para se evitar a formação de etringita tardia.

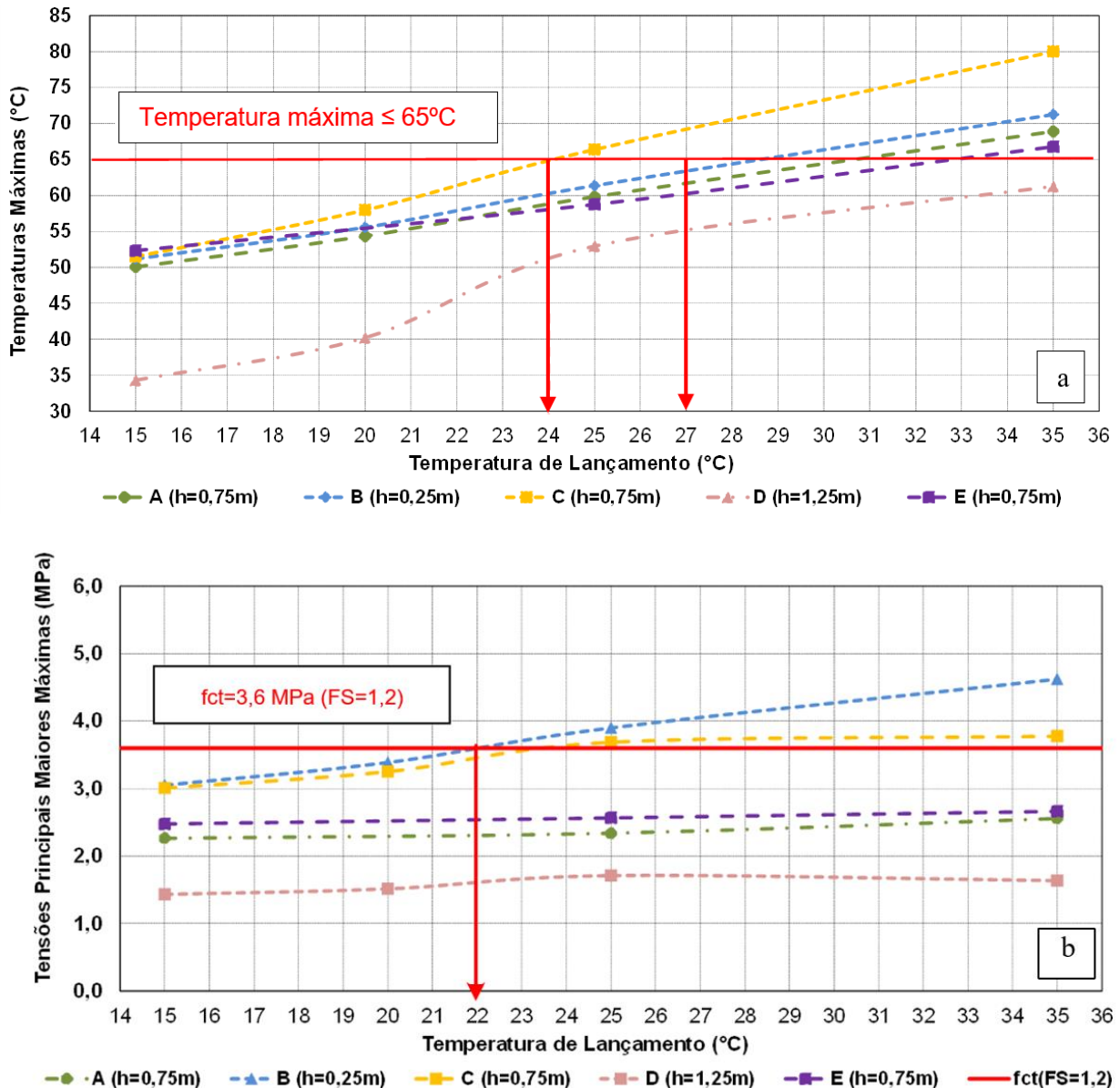


Figura 8 – (a) Resumo das máximas temperaturas e (b) resumo das tensões principais maiores nos pontos estudados considerando traço de concreto com consumo de cimento igual a 344 kg/m³ para a primeira camada de concretagem com altura de 1,5m

Através dos cálculos térmicos verificou-se que mesmo empregando a dosagem de concreto otimizada e com menor consumo de cimento houve necessidade de pré-refrigeração do

concreto através da substituição parcial da água de amassamento por gelo. As maiores tensões são verificadas nos pontos A e C localizados na região próxima ao contato lateral, com maior restrição a sua movimentação lateral (solo) e no centro de gravidade da estrutura, respectivamente. A tabela 5 indica as temperaturas de lançamento especificadas para lançamento do concreto e estimativa do consumo de gelo através de cálculo de balanço térmico considerando as temperaturas, consumo e calor específico dos materiais constituintes do concreto.

Tabela 5 – Comparação entre as simulações térmicas considerando os traços de concreto T344 e T411

Segmento da sapata (primeira camada)		T344	T411
f _{ck} (MPa)		45	45
Consumo de cimento (kg/m ³)		344	411
Relação água-cimento		0,50	0,45
f _{c28} (MPa)		58,5	75,0
Máxima elevação adiabática calculada (°C)		47,6	57,2
Temperatura de lançamento do concreto fresco	Da base até 1m	≤ 22°C	≤ 18°C
	Entre 1m e 1,5m	≤ 27°C	≤ 23°C
Consumo de gelo estimado (kg/m ³) - Temperatura dos agregados igual a 25°C	Da base até 1m (TL ≤ 22°C)	65 kg/m ³	93 kg/m ³
	Entre 1m e 1,5m (TL ≤ 27°C)	34 kg/m ³	62 kg/m ³

Com base nos estudos realizados na fase de projeto foi possível definir o traço de concreto a ser aplicado (T344) com menor consumo de cimento (67kg/m³ menor em relação ao traço T411) e conseqüente menor elevação adiabática do concreto (9°C, aproximadamente menor) que resultou na redução de 28 kg/m³ no consumo de gelo da base da estrutura até 1m de altura e 31 kg/m³ a partir desta altura e até 1,5m. Adotando a dosagem de concreto T344, foram realizadas as simulações térmicas para a segunda etapa da sapata onde considerou-se o seu lançamento sobre o concreto já existente (etapa anterior) e com maior restrição à movimentação e com menor dissipação do calor no contato com a primeira camada previamente executada. Após a realização dos cálculos houve uma alteração na quantidade de gelo estimada para o zoneamento de temperaturas máximas de lançamento a serem adotadas para a segunda etapa de concretagem sendo: a) da sua base até 1,0 m de altura a temperatura máxima de lançamento de 22°C, no máximo. Para atingir este valor foi estimada a quantidade de gelo de 65 kg/m³ e b) de 1,0m até 1,5m de altura a temperatura inferior a 27°C com consumo de gelo aproximado de 34kg/m³. As quantidades de gelo podem variar dependendo das condições ambientais da obra e tempo de transporte do concreto refrigerado até a obra.

5 Fase de execução da sapata

Para a execução da sapata foi adotado traço de concreto com consumo de cimento igual a 330 kg/m³ (consumo menor que o empregado nos estudos térmicos na fase de projeto) considerando sua substituição parcial por material pozolânico (14 kg/m³ de sílica ativa, SA),

que resultou em concreto mais seguro do ponto de vista térmico e com maior durabilidade em relação as dosagens empregadas nos estudos térmicos.

Tabela 6 – Comparação das características térmicas dos traços de concreto

Dosagens de concreto	Traço 411	Traço 344	Traço 344-SA
Consumo de cimento (kg/m³)	411	344	330
Consumo de sílica ativa (kg/m³)	-	-	14
Elevação adiabática (°C)	57,2	47,6	46,6
Rendimento térmico (°C/kg/m³)	0,139	0,138	0,138

Para a execução das regiões das juntas de construção verticais entre os segmentos da estrutura utilizou-se o mesmo traço de concreto, além da adição de 12kg/m³ de aditivo compensador de retração a base de óxido de cálcio, para que fosse garantida a perfeita aderência nesta região devido a menor retração do concreto. Na região das juntas verticais foi utilizada tela de metal expandido para conter o concreto de modo a facilitar o corte e passagem das armaduras da estrutura quando da sua montagem. A armação foi montada até a altura total da sapata e igual a 3 m conforme mostra a figura 9. O tratamento da junta de construção foi realizado através de corte verde químico no concreto fresco logo após a execução de cada segmento através da aspersão de aditivo retardador de superfície nas regiões das juntas de construção após uma hora, aproximadamente. O retardador de pega foi aspergido tanto nas juntas verticais, separando os diferentes trechos da estrutura, quanto nas juntas horizontais entre as camadas de concretagem com alturas iguais a 1,5m, cada. No dia seguinte à concretagem realizou-se a lavagem adequada da região das juntas horizontais e verticais (com remoção da tela de metal expandido) através de jato de água com pressão controlada para expor os agregados e garantir a aderência entre os concretos lançados. O primeiro trecho da sapata foi executado em agosto de 2019 com concretagens diárias para cada segmento da estrutura da fundação. As segundas camadas de concretagem dos segmentos foram executadas considerando intervalo de lançamento entre as camadas de 10 dias. A cura do concreto foi realizada através da realização de lâmina d'água e geotextil permanentemente úmido até o lançamento da camada seguinte.

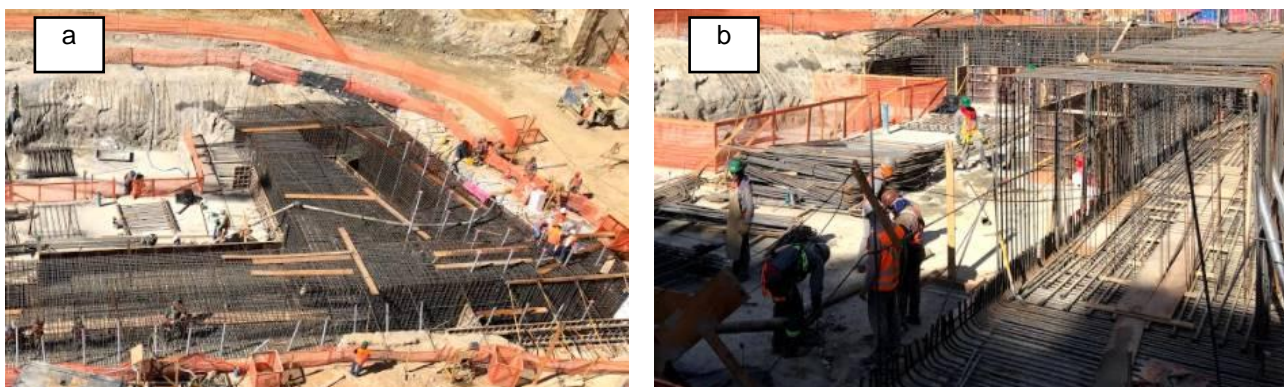


Figura 9 – Detalhes da execução da sapata de grandes dimensões da obra Faria Lima Plaza, em São Paulo, SP (Deseq, 2019): (a) vista superior da estrutura; (b) montagem da armação da estrutura.

Durante a sua execução foi realizado o acompanhamento das pesagens de todos os materiais do concreto pré-refrigerado, na central de concreto, por técnico de empresa de controle tecnológico. Quando da chegada de caminhões betoneira na obra realizou-se a determinação da temperatura do concreto fresco através de termômetro de haste calibrado e, estando em conformidade com as temperaturas previamente especificadas, era liberado o seu lançamento nas fôrmas. No recebimento do concreto fresco no canteiro de obras foram realizados ensaios de determinação do teor de ar incorporado e massa específica, além de moldagem de corpos de prova para ensaio de resistência à compressão nas idades de 7, 28 e 63 dias para todos os caminhões betoneira. Para ensaio de módulo de elasticidade na idade de 28 dias foram moldados corpos de prova a cada 40m³ de concreto lançado por etapa de concretagem. Foram instalados sensores para monitorar a evolução da temperatura ambiente e das temperaturas desenvolvidas no concreto (pontos A, B, C e E) através de termopares tipo “K” instalados no seu interior. Os sensores de temperatura foram conectados a um datalogger para registro automático das leituras a partir de um intervalo de leitura previamente programado. O período das leituras foi compreendido entre o início do lançamento do concreto até cinco dias, no mínimo, onde foi possível verificar o desenvolvimento das temperaturas no concreto após o seu lançamento. A temperatura máxima verificada no concreto foi de 62,7°C e ocorreu 34 horas após o início da concretagem, equivalente às 16h do segundo dia após o seu lançamento, no termopar 3 (ponto C), localizado a 0,75 m de altura da base da sapata e próximo a região central da estrutura (figura 10).

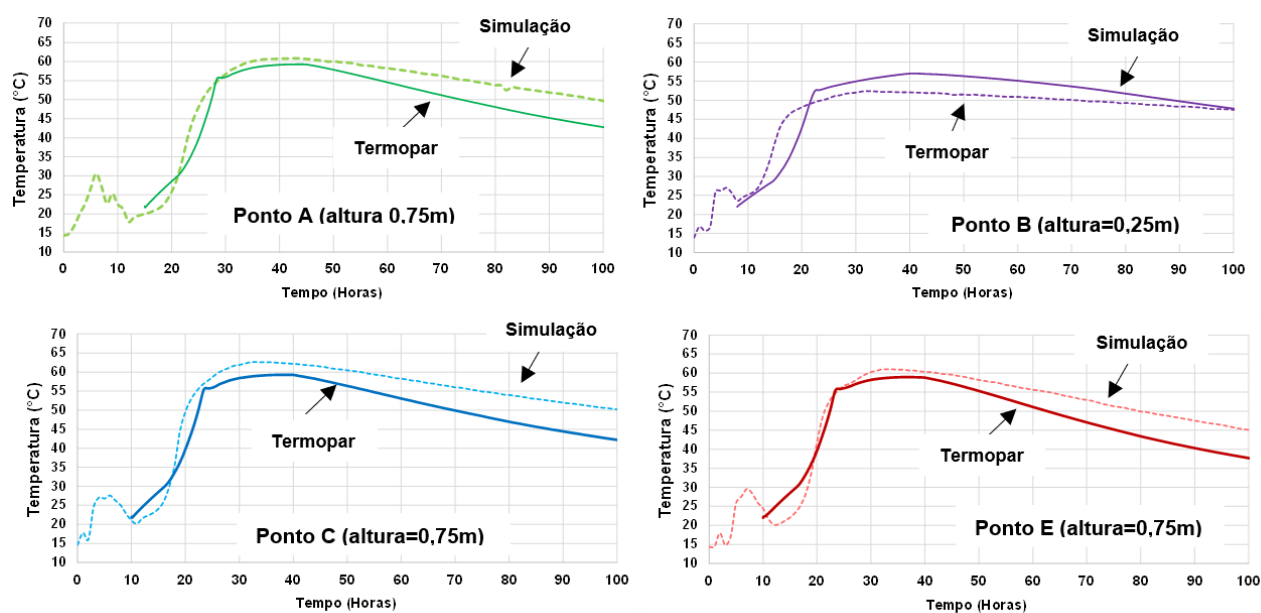


Figura 10 – Comparação da evolução das temperaturas simuladas e medidas no interior do concreto

As diferenças entre as máximas temperaturas lidas nos termopares instalados na estrutura de concreto e as temperaturas calculadas através da retroanálise pelo software foi cerca



de 2,9°C. Através do monitoramento da sua evolução por termopares nota-se que há uma taxa de resfriamento menor para os pontos A, C e E em relação ao modelo matemático empregado devido aos parâmetros de entrada estimados, principalmente condições de contorno e condutividade térmica do concreto. Para o ponto B localizado a 25 cm do lastro verificou-se maior perda de calor em relação aos termopares devido as propriedades estimadas para a base da fundação. Através dos dados de monitoramento dos termopares próximos aos valores calculados através do software ainda na fase de projeto verifica-se a importância deste tipo de análise em estruturas em concreto massa para definição do plano de concretagem.

6 Considerações finais

A sinergia entre a Obra, Projetista Estrutural e Tecnologia de Concreto na fase inicial de projeto foi fundamental para definir o melhor plano de execução da sapata do edifício Faria Lima Plaza em acordo com as condições logísticas da obra e com menor risco de fissuração do concreto por tensões de origem térmica e por DEF.

Através dos estudos preliminares dos traços de concreto através de dosagens experimentais e estudos através de estudos térmicos foi possível definir o melhor plano de concretagem considerando o traço de concreto com menor risco potencial de fissuração através da redução do seu consumo de cimento, além da previsão de juntas de construção verticais e horizontais para maior dissipação do calor e, conseqüentemente, conseqüentemente possibilitou a sua execução com temperaturas de lançamento mais liberais e com menor consumo de gelo para sua pré-refrigeração.

Com base nos cálculos térmicos realizados para as dosagens T344 e T411 para definição da temperatura de lançamento dos concretos da primeira etapa de concretagem verificou-se que a redução do consumo de cimento resultou em menor elevação da temperatura do concreto e economia no consumo de gelo de 30% (93kg/m³ para 65kg/m³) da base até altura de 1m e 45% (62kg/m³ para 34kg/m³) entre as alturas de 1m até 1,5m.

O emprego de material pozolânico como substituição parcial do consumo de cimento adotado no traço de concreto empregado na execução da estrutura em concreto massa contribuiu para reduzir as máximas temperaturas internas do concreto quando da hidratação do cimento. A redução de 67 kg/m³ no consumo de cimento resultou em uma economia de cerca de 240 toneladas de cimento apenas nas estruturas das fundações, uma vez que esta mesma dosagem foi utilizada para a execução da estrutura em questão, além de outros elementos da fundação com volume total de cerca de 3570m³. Estimando o preço do cimento como R\$0,40/kg, com base na tabela de índices da construção civil (SINAPI, 2020), isto equivale a uma economia de cerca de R\$95.000, além de uma redução de cerca de 135 toneladas de emissão de CO₂ na atmosfera proveniente da produção deste cimento, conforme estimativa baseada nos valores apresentados no ROADMAP Tecnológico do Cimento (SNIC, 2019).



7 Referências

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE **Mass Concrete**, Reported by ACI Committee 207, 2005.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, **Cement and Concrete Terminology**, Reported by ACI Committee 116, 2000.
- ASTM C1679-17, **Standard Practice for Measuring Hydration Kinetics of Hydraulic Cementitious Mixtures Using Isothermal Calorimetry**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. SINAPI, **Índice da Construção Civil**. Brasil, Governo Federal. Disponível em https://www.caixa.gov.br/site/Paginas/downloads.aspx#categoria_664/.
- EQUIPE DE FURNAS - Editor Walton Pacelli de Andrade, **Concretos: Massa, Estrutural, Projetado e Compactado com Rolo - Ensaios e Propriedades** - Ed. Pini, São Paulo-SP, 1997.
- FUNAHASHI JÚNIOR, E. I., **Influência do tipo de cimento Portland no desempenho de pastas e argamassas a partir de medidas calorimétricas: uma contribuição ao estudo de desempenho do concreto**. Dissertação - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 2018.
- NBR 6118: **Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**, ABNT, 2014.
- NBR 12006: **Cimento - Determinação do calor de hidratação pelo método de garrafa de Langavant - Método de ensaio**, ABNT, 1990.
- NBR 12655: **Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento**, ABNT, 2015.
- NBR 12819: **Concreto e argamassa — Determinação da elevação adiabática da temperatura — Método de ensaio**, ABNT, 2012.
- ROADMAP tecnológico do cimento, **potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050** / coordenado por Gonzalo Visedo e Marcelo Pecchio. Rio de Janeiro: SNIC, 2019, 64 p.
- TECOMAT ENGENHARIA, **Cuidados na execução de fundações em concreto-massa: Edificações verticais**, J.R. de Carvalho, 1. Ed, Recife, 2020, 55p.