

Projeto e controle de execução de *radier* estaqueado em edifício alto

FRANCISCO CARLOS MENDES LIMA – DIRETOR DE IMPERMEABILIZAÇÃO

ASSOCIAÇÃO BRASILENSE DE CONSTRUTORES DE BRASÍLIA – ASBRACO
MENDES LIMA ENGENHARIA / IBRACON

RENATO SALLES CORTOPASSI – DIRETOR

KALI ENGENHARIA
DIRETORIA DE MATERIAIS DO SINDUSCON DF

RESUMO

ESTE ARTIGO DEMONSTRA A IMPORTÂNCIA DE SE CONSIDERAR A INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA NO PROJETO ESTRUTURAL DE DA FUNDAÇÃO, EM UM CASO REAL DE RADIER ESTAKEADO NO EMPREENDIMENTO SKYGARDEN FLAMBOYANT – MARISTA, EM GOIÂNIA – GO. HOUE ALTERAÇÕES SIGNIFICATIVAS DAS SOLICITAÇÕES INICIAIS, SENDO QUE OS PILARES DE FACHADA TIVERAM SEUS ESFORÇOS ACRESCIDOS DA ORDEM DE 38%, QUANDO COMPARADAS COM CÁLCULO ESTRUTURAL COM APOIOS INDESLOCÁVEIS.

APRESENTA-SE TAMBÉM MELHORIAS NOS PROCEDIMENTOS EXECUTIVOS DA CONCRETAGEM DO RADIER ESTAKEADO, COMO CONTROLE RIGOROSO DOS PARÂMETROS DE UMIDADE RELATIVA DO AMBIENTE E DA TEMPERATURA DO CONCRETO DENTRO DA BETONEIRA, BEM COMO NO LANÇAMENTO DO CONCRETO DO RADIER. O CONTROLE DESSES PARÂMETROS DURANTE TODO O PROCESSO DE CONCRETAGEM VISOU REDUZIR A FISSURAÇÃO E CONTER OS PICOS DE TEMPERATURA NO LIMITE DE 65 °C, PARA ATENDER AS PREMISSAS DO PROJETO ESTRUTURAL DO RADIER.

Palavras-chave: edifício alto, interação solo-estrutura, controle tecnológico do concreto.

I. INTRODUÇÃO

o edifício Skygarden Flamboyant (Figura 1) está sendo construído na cidade de Goiânia, sendo concebido como um edifício alto para os padrões brasileiros, com cerca de 170 m, apesar do *Council for Tall Buildings and the Urban Habitat* (CBTUH) considerar o edifício alto a partir de 200 m. Sua estrutura foi concebida com concreto armado convencional, composta por pilares, vigas e lajes. Possui 2 subsolos mais 53 pavimentos, no total de 172,41 metros de altura acima do nível do térreo.

A fundação, que já foi concluída, é do tipo *radier* estaqueado, composto de *radier* com altura de 2,10 m, além de 241 estacas do tipo hélice contínua monitorada, com 70 cm de diâmetro e média de 13,50 m de profundidade. O concreto do *radier* estaqueado possui

resistência à compressão de 40 MPa. Este *radier* estaqueado, considerado um dos maiores do Brasil, foi projetado utilizando o conceito da Interação

Solo-Estrutura, metodologia obrigatória no dimensionamento de edifícios altos, de acordo com NBR 6122 Projeto e execução de fundações.

Devido ao elevado volume de concreto do *radier*, foi necessário um estudo térmico, para controle rigoroso da temperatura e da umidade, e cura durante todo o processo de concretagem, visando reduzir a fissuração e conter os picos de temperatura no limite máximo de 65°C, atendendo as premissas do projeto estrutural do *radier*.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Cálculo do *radier* estaqueado

No cálculo estrutural convencional, uma das hipóteses usuais consideradas é que as fundações são indeslocáveis. Na verdade, isso não



▶ **Figura 1**

Imagens digitais e em 3D do Edifício Skygarden Flamboyant – Marista em Goiânia – GO

acontece, pois sempre existe um recalque de fundação para qualquer carga aplicada. Em obras residenciais e edifícios baixos, essa hipótese pode ser aceitável, devido ao reduzido recalque das fundações.

Os edifícios altos apresentam carregamentos elevados, gravitacionais, acidentais verticais e de vento. As cargas geram recalques nas fundações, de tal magnitude que podem interferir tanto nos esforços das peças estruturais, como na estabilidade global da estrutura. Da mesma forma, o cálculo da previsão de recalque das fundações, quando feito separado da estrutura, fica distinto da realidade, já que a rigidez da estrutura interfere nos deslocamentos. O cálculo das fundações e estruturas de forma integrada é feita pela Interação Solo-Estrutura (ISE), ou ainda, conforme o termo mais recentemente adotado na norma NBR 6122, Interação Fundação-Estrutura (IFE).

Depois de muitos trabalhos publicados em todo o mundo apresentando a importância da Interação Solo-Estrutura, a atualização da norma brasileira NBR 6122:2019, em seu item 5.5,

prescreve a obrigatoriedade do estudo da interação fundação-estrutura para alguns casos específicos, dentre eles estruturas com mais de 55 m de altura.

Para os projetistas de fundação, a ISE pode resultar em redução dos recalques distorcionais (Figura 2), conforme apresentada por Gusmão (1994).

Gusmão (1994) apresenta parâmetros que facilitam a interpretação da ISE:

- Fator de recalque absoluto

$$AR = \frac{W_i}{W_m}$$

- Fator de recalque diferencial

$$DR = \frac{W_i - W_m}{W_m}$$

Onde:

W_i = recalque do pilar i ;

W_m = média do recalque de todos os pilares.

Na primeira revisão do projeto estrutural (rev0), os esforços solicitantes nos pilares foram obtidos com a hipótese de fundações indeslocáveis. As cargas foram utilizadas para a rev0 do projeto de fundação (Figura 3).

Observa-se, na Figura 3, que alguns pilares da torre do prédio foram projetados inicialmente em blocos separados do *radier* estaqueado central. Essa separação resultou em recalques distorcionais elevados. Lançados esses recalques no projeto estrutural, a estabilidade global da estrutura ficou com-

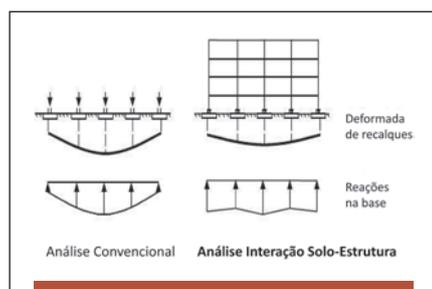
prometida. A revisão rev1 do projeto de fundação foi elaborada com um *radier* estaqueado para todos os pilares da torre do prédio (Figura 4). Essa revisão já atendeu à estabilidade global do projeto estrutural.

Foi elaborada mais uma interação, resultando em uma revisão de cargas (rev2), onde o diferencial de carga dos pilares, quando comparado com a revisão anterior, ficou abaixo de 5%.

A Tabela 1 apresenta os valores do fator de recalque absoluto e diferencial, obtidos no cálculo de recalque da fundação do Skygarden Flamboyant. Foram elaboradas 3 interações mostradas na tabela como rev0, rev1 e rev2.

Portanto, o pilar P3 obteve, na previsão de recalques, valor em torno de 38% menor do que a média dos recalques. Isso significa que, devido ao cálculo utilizando ISE, foi obtido para esse pilar valor de carga em torno de 38% maior, quando comparada com o carregamento obtido no cálculo que supõe fundação indeslocável.

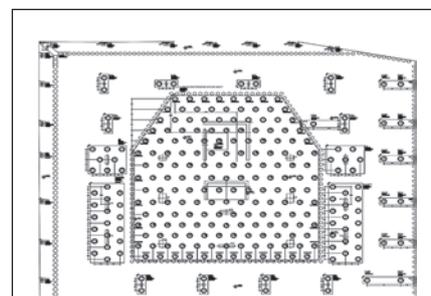
Normalmente, os pilares de fachada, ou mais afastados do centro da edificação, devido ao efeito de grupo no cálculo do recalque das fundações, tendem a deformar verticalmente



► **Figura 2**

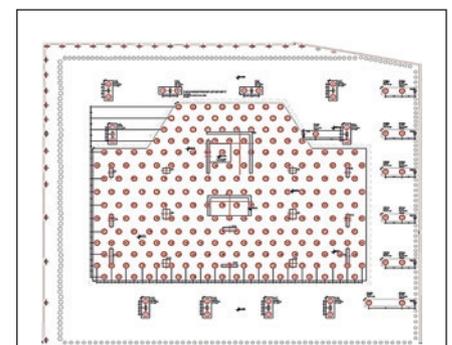
A interação solo-estrutura considera a rigidez da superestrutura e pode reduzir os recalques distorcionais em projetos de fundação

Fonte: Gusmão (1994)



► **Figura 3**

Projeto de fundação elaborado na primeira interação



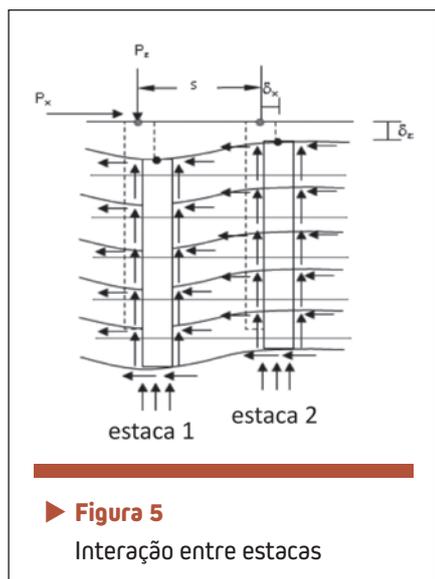
► **Figura 4**

Projeto de fundação elaborado na segunda interação

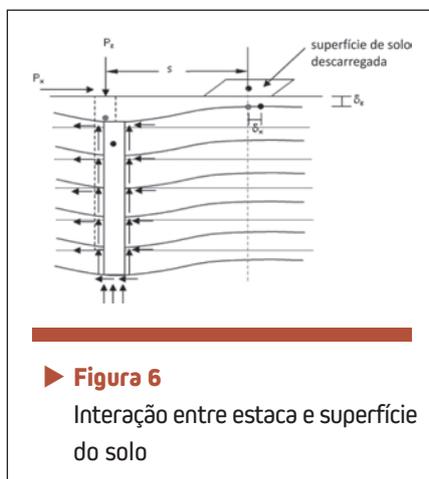
► Tabela 1 – Valores dos recalques, do fator de recalque absoluto (AR) e do fator de recalque diferencial (DR), calculados no baricentro de cada pilar da torre do prédio em 3 interações

Pilar	Recalques rev2 (mm)	AR rev2	DR rev2	Recalques rev1 (mm)	AR rev1	DR rev1	Recalques rev0 (mm)	AR rev0	DR rev0
P1	13,79	1,01	1,17%	13,89	1,01	0,58%	15,01	1,19	18,94%
P2	14,93	1,10	9,54%	15,72	1,14	13,83%	16,88	1,34	33,76%
P3	8,47	0,62	-37,86%	8,84	0,64	-35,99%	4,37	0,35	-65,37%
P4	13,54	0,99	-0,66%	14,58	1,06	5,58%	14,91	1,18	18,15%
P5	14,41	1,06	5,72%	14,24	1,03	3,11%	14,91	1,18	18,15%
P6	9,17	0,67	-32,72%	8,69	0,63	-37,07%	4,49	0,36	-64,42%
P7	18,65	1,37	36,83%	19,23	1,39	39,25%	20,61	1,63	63,31%
P8	16,28	1,19	19,44%	17,28	1,25	25,13%	17,42	1,38	38,03%
P9	17,04	1,25	25,02%	17,15	1,24	24,19%	17,00	1,35	34,71%
P10	11,14	0,82	-18,27%	11,43	0,83	-17,23%	6,38	0,51	-49,45%
P11	11,94	0,88	-12,40%	11,63	0,84	-15,79%	6,59	0,52	-47,78%
P12	18,46	1,35	35,44%	18,86	1,37	36,57%	20,10	1,59	59,27%
P13	10,18	0,75	-25,31%	10,03	0,73	-27,37%	6,74	0,53	-46,59%
P14	10,92	0,80	-19,88%	10,41	0,75	-24,62%	6,55	0,52	-48,10%
P15	13,62	1,00	-0,07%	13,69	0,99	-0,87%	13,27	1,05	5,15%
P16	14,05	1,03	3,08%	13,79	1,00	-0,14%	13,09	1,04	3,72%
P17	15,18	1,11	11,37%	15,23	1,10	10,28%	16,15	1,28	27,97%
Média	13,63			13,81			12,62		
CV	0,222			0,237			0,439		

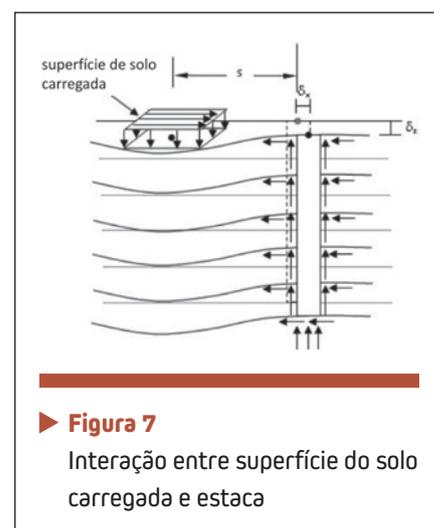
menos, absorvendo mais carregamento. O contrário acontece com os pilares do centro.

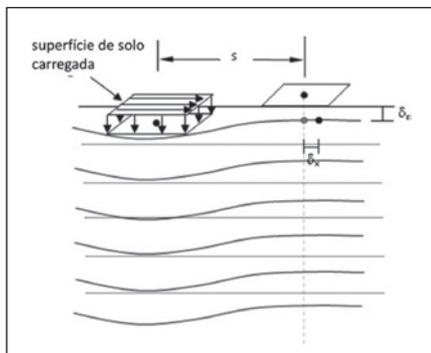


Outro aspecto muito importante no cálculo de fundações de edifícios altos é a consideração do efeito de interação entre os elementos de fundação. Chow (2007) apresenta



as possíveis interações em um *radier* estaqueado, conforme mostrado nas figuras de 5 a 8.





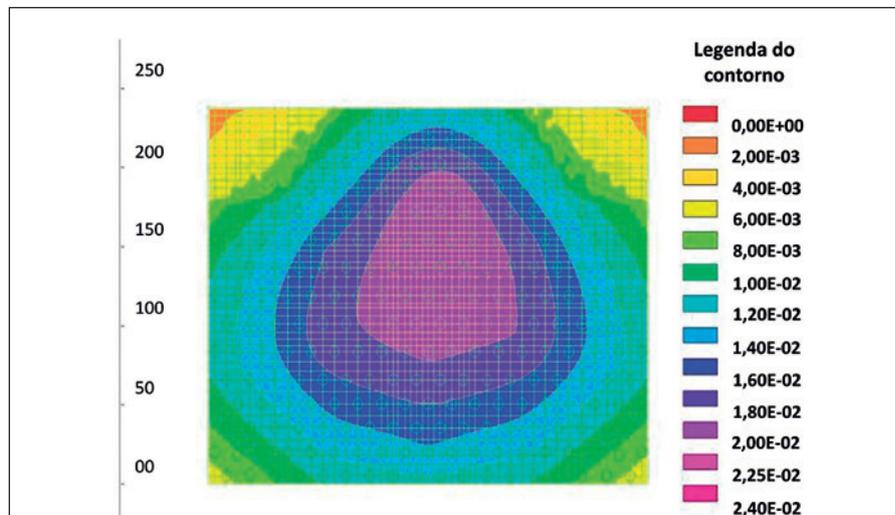
► **Figura 8**
Interação entre superfície do solo carregada e superfície do solo descarregada

Uma estaca carregada interage com outra estaca próxima provocando um recalque na vizinha, mesmo quando ela não tem carregamento. Da mesma forma, uma superfície carregada provoca recalque em uma estaca, e vice-versa. No caso em questão, as interações acrescentaram cerca de 4 vezes o recalque, quando comparado com o cálculo sem interações entre estacas e superfície do solo. É importante ressaltar que, mesmo para fundações em blocos sobre estacas, existem as interações entre os elementos de fundação, que devem ser avaliadas, principalmente em prédios altos.

Para o cálculo das deformadas e esforços do *radier* estaqueado do Skygarden Flamboyant, foi utilizado o software GARP – *Geotechnical Analyses of Rafts with Piles*, desenvolvido por Small e Poulos (2007).

O software GARP analisa o *radier* como placa com 8 nós pelo Método dos Elementos Finitos. O conjunto estacas-solo utiliza a teoria da elasticidade. A estimativa das interações entre estacas é analisada pelo método dos elementos de contorno.

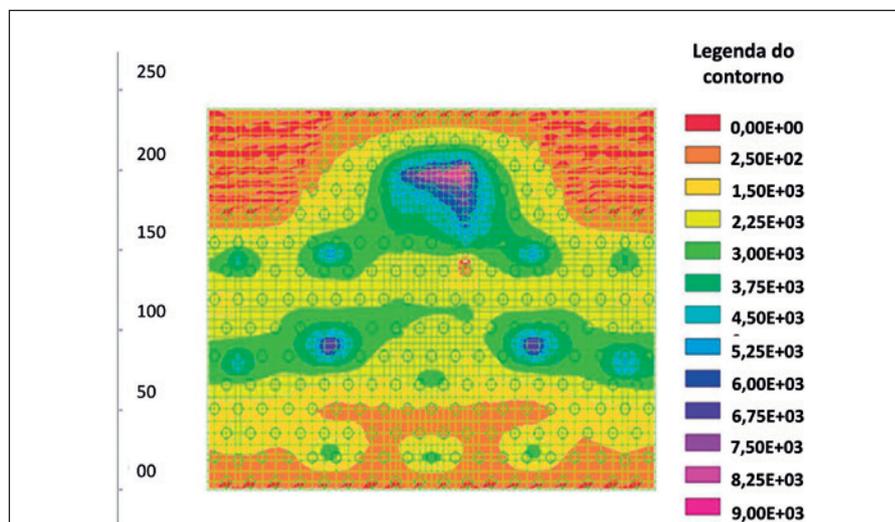
Os coeficientes de mola das esta-



► **Figura 9**
Deformada do *radier* estaqueado para verificação do ELS-DEF, com software GARP

cas foram obtidos com provas de carga estática nas estacas. A deformada crítica do *radier* calculada para o ELS-DEF segue na figura 9, para um exemplo de uma das hipóteses de carregamento, e seu valor máximo foi 24 mm. Todos os recalques distorcionais entre pilares resultaram menores que $L/500$.

Para orientar o dimensionamento estrutural do *radier* estaqueado, o software GARP emite as isocurvas de momento fletor M_x e M_y , para as várias hipóteses de carregamento. As isocurvas de momento M_x apresentada na Figura 10 são para uma hipótese específica de carregamento.



► **Figura 10**
Isocurvas de momento fletor M_x para verificação do ELU



► **Figura 11**
Corte esquemático do radier estaqueado, com a posição das armaduras e etapas de concretagem

O momento máximo do *radier* estaqueado foi 9.750 tfm.

Nas áreas de maior solicitação à flexão, foram necessárias 3 camadas de aço de 32mm, espaçadas a cada 12 cm, no cálculo em ELU. A Figura 11 apresenta o corte esquemático do projeto do *radier* estaqueado.

Foram instalados medidores eletrônicos tipo *strain gauges* em todos os pilares da torre do prédio. Com isso, está sendo possível realizar o monitoramento da carga medida em cada pilar. Além disso, algumas estacas foram também instrumentadas para a medição de suas cargas, além de células de pres-

são para medir a tensão de trabalho no solo abaixo do *radier*. Foram fixados pinos nos pilares para que os recalques sejam controlados com o avanço da construção do prédio. Essas medições possibilitam total controle da resposta da fundação do prédio frente às suas solicitações, permitindo intervenções em tempo hábil, caso necessário.

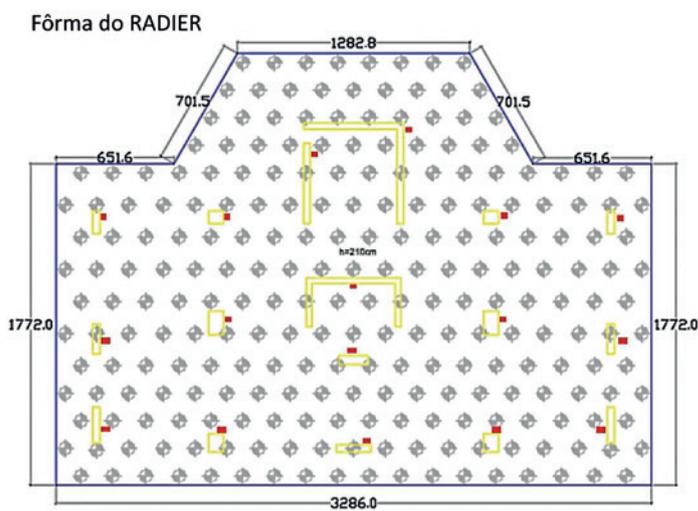
2.2 Controle executivo da concretagem

Em função da sua magnitude, com geometria aproximada em planta de 33m x 24m, e altura de 2,10 m, com

volume total de 1.422,00 m³ (Figura 12), foi elaborado um Estudo Térmico, com o objetivo principal de gerar subsídios para o sistema de execução, de modo a se prever medidas de controle para diminuir os efeitos indesejáveis do calor de hidratação do cimento. Foram feitas diversas simulações com o intuito de definir a opção com melhor viabilidade técnica e econômica para execução deste *radier*.

Verificou-se que o pico de temperatura para a simulação em etapa única de concretagem tinha potencial para atingir até 83,5°C, situação onde se teria 100% da etringita dissolvida. Na execução em duas camadas defasadas de 7 dias, têm-se picos de temperatura de 73,4°C e 76,5°C, para a primeira e segunda camada, respectivamente. Desta forma, ambas as alternativas mostraram inviáveis do plano de vista técnico, sendo imperativo proceder com estudos com pré-refrigeração do concreto. Verificou-se que, na situação de duas camadas, com gelo e com temperatura de lançamento fixada em 22°C, os picos de temperatura encontram-se abaixo de 60°C, situação favorável do ponto de vista de temperatura. Do ponto de vista da análise de tensões, notou-se que o limite de resistência à tração do concreto é superado também nesta alternativa de execução. Assim, adotou-se a execução do *radier* em duas camadas iguais de 1,05m de altura, com temperatura máxima de lançamento do concreto fixada em 22°C, adotando a substituição de 100% da água por gelo, exceto a água proveniente da umidade dos agregados (Figura 13).

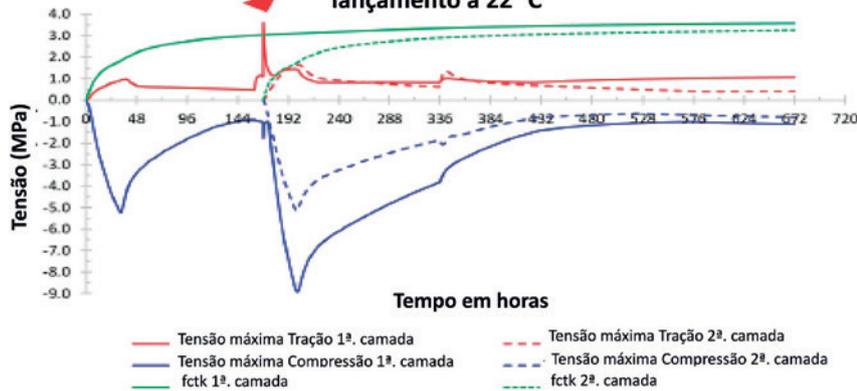
Foram propostas melhorias nos procedimentos executivos da concretagem do *radier* estaqueado, que, devido



► **Figura 12**
Radier em planta reproduzido do projeto



Envoltória de Tensões para situação em duas camadas e lançamento a 22 °C



► **Figura 13**

Gráfico de tensões oriundas da retração térmica simuladas para a configuração de execução em duas camadas com gelo

às suas elevadas dimensões, exigiram um controle rigoroso dos parâmetros de umidade relativa do ambiente e da temperatura do concreto (Figura 14). Devido à sua elevada responsabilidade estrutural, O concreto deste *radier* foi dosado com aditivo cristalino e gelo, com objetivo de reduzir riscos de fissuras evitar o acesso de água, e o surgimento de reações deletérias.

As figuras 15, 16 e 17 mostram a sequência de concretagem do *radier* estaqueado.

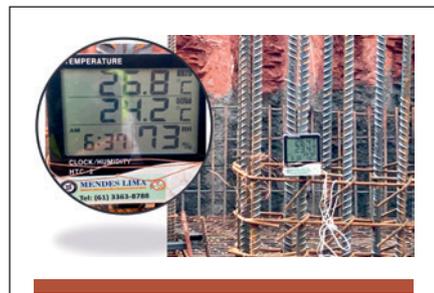
O objetivo do controle rigoroso durante todo o processo de concretagem foi proporcionar uma redução significativa da fissuração e conter os picos de temperatura devido ao calor

de hidratação do concreto do *radier*. As temperaturas do concreto dentro da betoneira foram medidas entre 14,5 e 21,5 °C, e a temperatura do concreto do *radier* foi monitorada, com a introdução de termopares, alcançando temperatura máxima de 63,3°C (Figura 18). Os valores de temperatura permaneceram dentro do limite de 65°C visando atender as premissas do projeto estrutural do *radier*.

A infiltração de água, a falta de estanqueidade e problemas no sistema de drenagem são as causas de grande parte das manifestações patológicas do concreto de fundações, colaborando diretamente para a redução de seu desempenho estrutural e sua durabilidade.

Para resolver problemas de fissuração e a consequente infiltração de água, além dos sistemas convencionais de impermeabilização, hoje existem métodos e sistemas de última geração, mais eficazes e menos onerosos, como o uso do concreto autocicatrizante, que garantem proteção do concreto contra a ação de agentes e ambientes agressivos. Essa proteção pode ser obtida por um mecanismo de formação de cristais extras na microestrutura convencional do concreto, induzidos pela adição dos aditivos cristalinos para aumentar a chamada impermeabilização integral por cristalização desde as fundações, como neste *radier* estaqueado, foco principal deste artigo.

Como relatado, há várias pesquisas e estudos que demonstram a viabilidade e



► **Figura 14**

Controle da temperatura do concreto e da umidade relativa do ambiente, na concretagem em duas camadas do *radier* estaqueado



► **Figura 15**

Lançamento do concreto autoadensável do *radier* estaqueado



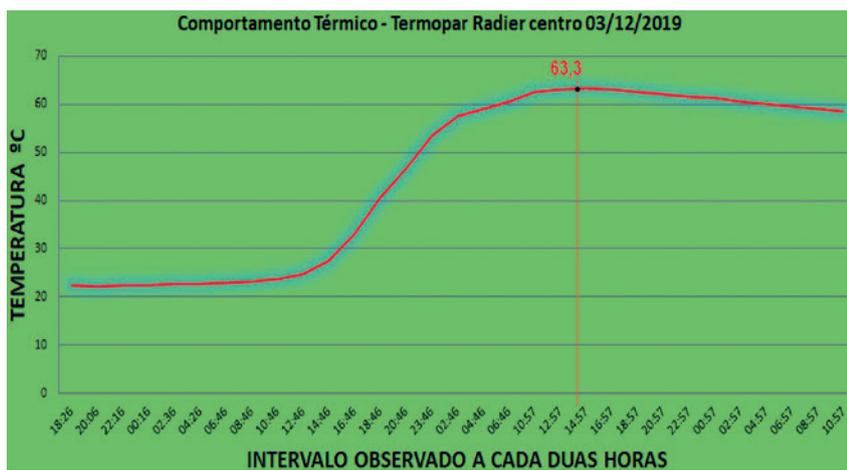
► **Figura 16**

Finalização da concretagem da última camada do *radier* estaqueado



► **Figura 17**

Cura do concreto com lâmina d'água de 15 cm, por 7 dias



► **Figura 18**
Controle da temperatura do *radier* nas duas etapas de concretagem

utilidade do emprego de aditivos cristalizantes adicionados na massa do concreto, para obter a autocicatrização autônoma “engenheirada” em obras e estruturas novas. Sua principal função é reduzir o ingresso de águas agressivas e colmatar fissuras de até 0,5mm. No cálculo estrutural, no Estado Limite de Serviço (ELS), admite-se fissuras de até 0,2 mm. Com isso, reduzem substancialmente o risco de reações deletérias, pois todas elas (AAR, sulfatos, carbonatação e cloretos) dependem da presença de água. Barrar o ingresso da água é a missão e propósito desses aditivos cristalizantes.

3. CONCLUSÕES

3.1 Cálculo do *radier* estaqueado

O *radier* estaqueado é uma fundação adequada aos edifícios altos, já que possibilita redução de recalques distorcionais, que são elevados

devido à magnitude do carregamento.

A utilização da ISE no cálculo de edifícios altos indicou acréscimo de esforço solicitante nos pilares da fachada. Esse acréscimo pode ser superior ao coeficiente de segurança dos pilares. Caso fosse adotada a hipótese de apoios indeslocáveis, poder-se-ia resultar em ruptura de pilares de fachada.

As fundações de edifícios altos devem ser projetadas considerando a interação entre as estacas, além da interação entre estacas e superfície do solo. No projeto do Skygarden Flamboyant, a consideração dessas interações obteve um acréscimo de 4 vezes o recalque máximo.

Apesar da norma de fundações NBR 6122 obrigar a IFE para o cálculo de fundações de prédios acima de 55 m, os edifícios e construções convencionais deveriam também adotar essa metodologia, já que representa melhor a realidade das edificações.

A comunidade técnica deveria medir com mais frequência o desempenho das suas fundações, bem como das peças estruturais, para que sejam confirmadas e aprimoradas as metodologias de cálculo.

3.2 Controle executivo da concretagem

A interação do projeto estrutural da fundação com o controle de execução da concretagem mostrou-se eficaz.

O controle rigoroso durante todo o processo de concretagem obteve êxito na redução da fissuração e na contenção dos picos de temperatura, no limite de 65°C, visando atender as premissas do projeto estrutural do *radier*.

Mitigou-se os efeitos da etringita tardia (*DEF – Delayed Ettringite Formation*) decorrente da expansão e fissuração retardada da etringita mineral, em função do excesso de calor.

AGRADECIMENTOS

Ao Grupo Palme, responsável pela construção do Skygarden Flamboyant e pela contratação e compatibilização de todos os projetos. A Esper Engenharia de Projetos, responsável pelo cálculo estrutural. A PhD Engenharia, responsável pela avaliação técnica do projeto (ATP). A Engesol Engenharia de Solos, responsável pelo projeto de fundações e contenções. 📧

► REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Projeto e execução de fundações. NBR 6122: 2019.
- [2] Chow, H. Analysis of pile-raft foundations with piles of different lengths and diameters. PhD thesis. University of Sydney, 2007.
- [3] Gusmão, A. D.; Gusmão Filho, J. A. . Avaliação da influência da interação solo – estrutura. In. X COBRANSEF, Foz de Iguaçu, PR, ABMS. Anais, 1994, Vol.1, p. 68-74.
- [4] IBRACON. Comentários e exemplos de aplicação. NBR 6118: 2014.
- [5] Small, J.C. and Poulos, H. G. A method of analysis of piled rafts. Proceedings of the 10th ANZ Conference on Geomechanics, Brisbane. Australian Geomechanics Society, 2007, Vol. 2, pp. 602-607.

