Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções
CBPAT2016

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

USO DE ADITIVO REDUTOR DE PERMEABILIDADE EM LAJES DE SUBPRESSÃO. CASO HABITAR-DF

M. MOREIRA
Engenheira Civil
UnB
DF; Brasil
mirellenunb@outlook.com

M. A. R. MANZANO
Engenheiro Civil
UnB
DF; Brasil
malroma81@gmail.com

E. F. SILVA
Engenheira Civil
UnB
DF; Brasil
eugenia@unb.br

R. BLANCO
Engenheiro Civil
Habitar
DF; Brasil
rogerioblanco@habitardf.com.br

RESUMO

O tempo que o concreto deve manter suas propriedades, conhecido como vida útil, é um importante parâmetro de projeto para o desempenho das estruturas. Um concreto poroso tem um maior grau de permeabilidade à água e à agentes agressivos, o que pode ocasionar a deterioração das armaduras por mecanismos como a corrosão. Além de não garantir a estanqueidade, por exemplo, em lajes sob pressão hidrostática negativa (lajes de subpressão). Esse tipo de laje tem sido utilizada com o objetivo de viabilizar ou facilitar ações construtivas associadas a estruturas situadas abaixo do nível do lençol freático. Várias são as vantagens desse tipo de construção: redução de impactos ambientais uma vez que evita a instalação de sistemas permanentes de bombas submersas, o que diminui o uso de energia elétrica; não ocorrência de recalques ocasionados pelo rebaixamento do lençol freático, que se estende para as áreas adjacentes ao canteiro de obras; e menor impacto sobre a água subterrânea, o que acarreta consequências graves na disponibilidade desse recurso nas áreas urbanas. Esse artigo apresenta um estudo de caso sobre a concretagem de uma laje de subpressão, com 30cm de espessura e volume de 750m^3, em concreto armado, de um edifício residencial misto, situado no Setor Noroeste, Brasília-Distrito Federal (Brasil). Para garantir a estanqueidade dessa laje de subpressão, utilizou-se um aditivo redutor de permeabilidade a pressão hidrostática, conhecido pela sua capacidade de promover o selamento de fissuras de até 0,4mm através do fenômeno de autocicatrização. Os resultados comprovaram que tanto a composição do concreto (contendo aditivo redutor de permeabilidade) quanto à adoção de estratégias construtivas adequadas, foram fundamentais para se garantir uma estrutura íntegra e estanque.

Palavras-chave: laje de subpressão, aditivo redutor à pressão hidrostática, estanqueidade, durabilidade.

ABSTRACT

The time required for the concrete to maintain its mechanical and physical properties, known as “lifetime”, is an important project parameter. A porous concrete (higher permeability) is more susceptible to the infiltration of water and aggressive substances, which leads to the deterioration of the steel reinforcement and the loss of tightness. For instance, slabs under negative hydrostatic pressure, also known as *anti-flotation slabs*, are employed in cases where the construction is situated below the water table. There are several advantages in this type of construction: less impact into the construction site due to the lowering of the water table level, preservation of subterranean water and reduction of environmental damages, since it does not required electricity to run water pumps. This work presents a case study concerning the construction of a 30cm thick and 750m^3 *anti-flotation* slabs of reinforced concrete used into the construction of a residential building in Brasília, Brasil. In order to assure the tightness of such structure, a catalyst additive is used. This catalyst is known for its capacity of sealing cracks under 0,4mm by self-healing. The results showed that both the composition of the concrete (containing permeability-reducing admixture) and the adoption of appropriate constructive strategies were essential to ensure a integer and watertight structure.

Keywords: anti-flotation slabs, permeability-reducing admixture: hydrostatic conditions, tightness, durability.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

1. INTRODUÇÃO

Diversos fatores podem comprometer o desempenho de uma estrutura no que se refere a impermeabilidade ao longo do tempo. Estes fatores, sejam eles internos ou externos, como ataque por sulfatos e cloretos, desgaste da superfície, carbonatação, intemperismo, reações álcali-agregado e até mesmo a execução de procedimentos em desacordo com as normas podem ocasionar patologias no concreto como corrosão nas armaduras, redução de seção do aço, juntas frias e fissuras, que reduzem a vida útil da estrutura e consequentemente, comprometem a durabilidade do sistema.

Com a publicação da ABNT NBR 6118: 2014 [1] foi previsto a utilização de concretos de resistências mais elevadas. Este tipo de concreto apesar de proporcionar grandes vantagens, tanto econômicas quanto estruturais, como alta resistência aos esforços mecânicos, baixa porosidade e permeabilidade e, consequentemente, um menor tempo e custo para a manutenção. Por outro lado, há desvantagens como um elevado grau de retração autógena e térmica, maiores deformações e mudanças volumétricas no concreto. E, por serem críticas nas primeiras idades tornam o concreto mais vulnerável podendo ocasionar fissuras, que podem deteriorar as propriedades mecânicas e/ou a durabilidade do concreto.

Quando se trata de durabilidade, a definição não deve ser baseada apenas na relação água/cimento, no teor de cimento ou com a especificação de uma resistência mínima à compressão. A durabilidade pode ser quantificada através de baixa permeabilidade, que é uma característica de desempenho do concreto (Lema [2]). Um concreto é considerado durável quando sua estrutura original se mantêm integra quando expostos a qualquer processo de degradação.

Além disso, para concepção de obras capazes de promover uma barreira eficiente ao ingresso de água, tais como: barragens, estações de tratamento de água, reservatórios de armazenamento de água, lajes de subpressão, faz-se necessário a utilização de materiais resistentes, impermeáveis e com baixa permeabilidade. E, de acordo com Britez *et al* [3], a maior problemática no uso do concreto nestas situações está relacionada com a dificuldade de se obter a estanqueidade da estrutura final, que depende tanto do material quanto dos procedimentos executivos condizentes com boas práticas de execução, para que não ocorra a formação de fissuras ou juntas frias não previstas, através das quais possa ocorrer a percolação de água.

De acordo com Takagi [4], o concreto é um material susceptível à formação de fissuras. Sendo que, quanto maior a abertura da fissura, maior é o comprometimento da sua durabilidade, sendo necessário o seu reparo. A introdução intencional de propriedades autocicatrizantes no concreto poderia ser benéfica. Pois, representa uma economia de custos diretos, tanto de produtos quanto de mão de obra dos serviços para o reparo, e também de custos indiretos porque estas estruturas necessitariam ficar em desuso durante o seu reparo e manutenção.

Ourives [5] menciona que várias técnicas tem sido desenvolvidas para a diminuição da permeabilidade no concreto. Uma vez que, isso pode assegurar maiores resistências mecânicas e durabilidade. Para se reduzir a passagem de fluidos pelo concreto é preciso uma melhoria na pasta de cimento que envolve os agregados, a partir do uso de baixas relações água/cimento, de maiores consumos de cimento, da utilização de aditivos redutores de água (superplastificantes). Além disso, existe a opção tecnológica do uso de aditivos específicos para impermeabilização, que reduzem a permeabilidade do concreto, por meio da cristalização integral dos seus poros e capilares.

Com a criação do comitê técnico SHC 221 da RILEM [6], diferentes abordagens vêm sendo desenvolvidas para o estudo de um concreto que tenha a capacidade de autoreparar suas próprias fissuras. Conforme o comitê, concreto autocicatrizante é um compósito capaz de se autocurar quando danificado, sem a intervenção externa, inspirado por sistemas biológicos como a pele humana, que é capaz de se regenerar.

Propriedades autocicatrizantes podem ser introduzidas na microestrutura do concreto, a partir do uso de aditivo redutor de permeabilidade durante a sua produção. De acordo com o relatório ACI 212.3R -10 [7], sobre aditivos químicos, os que visam reduzir a permeabilidade podem ser classificados como: Aditivos redutores de permeabilidade não expostos a pressão hidrostática (ARPNH) e os Aditivos redutores de permeabilidade expostos à pressão hidrostática (ARPH).

Os ARPH's são materiais cimentícios sintéticos classificados como impermeabilizantes hidrófilos, que reduzem a permeabilidade a partir do aumento de resistência à penetração de água sob pressão no concreto, proporcionando um aumento da durabilidade da estrutura. Ainda em concordância com o ACI 212.3R -10 [7], os ARPH's são aditivos cristalinos que, em presença d'água e partículas de cimento, no concreto, formam hidratos de silicato de cálcio ocasionando o bloqueio dos poros nas microfissuras existentes.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

Lema [2] cita que os aditivos cristalinos são compostos por ingredientes ativos que na presença de água livre do concreto, reagem com os compostos da pasta tais como: hidróxido de cálcio, alumínio, óxidos metálicos e água; e formam uma estrutura cristalina insolúvel no interior dos poros e fissuras de até 0,4mm de abertura. A formação destes cristais proporcionará propriedades de impermeabilização resultando maior resistência a penetração de água e, consequentemente, maior durabilidade e vida útil a estrutura.

Concretos autocicatrizantes foram utilizados na laje de subpressão estanque em concreto armado do Museu da Imagem e do Som (M.I.S) [3] , em Copacabana (RJ). Sendo uma laje de 1m de espessura, com volume de 1200m^3 e uma relação água/aglomerante de 0,35 (Figura 1-a). Para a cobertura fluida do Museu de Arte do Rio (M.A.R) [8], no centro da cidade do Rio de Janeiro, também foi especificado um concreto autocicatrizante com volume de 320m^3 e uma relação água/aglomerante de 0,45 (Figura 1-b). Na construção da laje no subsolo do Condomínio Adelaide, localizado próximo da Baía de Todos os Santos em Salvador (BA), foi utilizado 630m^3 de concreto autocicatrizante para uma relação água/aglomerante em torno de 0,47 (Figura 1-c).

Com o objetivo de garantir maior durabilidade à estrutura, aditivos para impermeabilização com propriedades autocicatrizantes também foram utilizados na reforma do complexo do Estádio Governador Magalhães Pinto – o Mineirão, em Belo Horizonte (MG), que envolveu a ampliação do estádio e a construção do Museu do Futebol Brasileiro, na atualização tanto do Estádio Estadual Kleber Andrade, em Cariacica (ES), quanto do Estádio Castelão, em Fortaleza (CE), conforme ilustrado na Figura 1-d.



(a) (b)

(c) (d)

Figura 1: Obras onde foram utilizados concretos cicatrizantes: (a) Museu de Arte do Rio - RJ [9], (b) Museu da Imagem e do Som -RJ [10], (c) Condomínio Adelaide – BA [5] e (d) Complexo do Estádio Mineirão – MG [11].

2. DADOS DE PROJETO E PROCEDIMENTOS ADOTADOS NA CONSTRUÇÃO DA LAJE

2.1 Dados básicos de projeto

A região Noroeste de Brasília - Distrito Federal, rodeada de áreas verdes, é considerada o primeiro bairro ecológico planejado do Brasil. Formado por 20 quadras, 11 lotes, 220 prédios residenciais, 140 edifícios comerciais e áreas exclusivas para ciclovia. Sendo o último setor habitacional a ser construído, na área tombada como patrimônio histórico e cultural da humanidade, em Brasília, e todo o conjunto foi amparado por soluções sustentáveis.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

O empreendimento, que faz parte deste conjunto (Figura 2), é uma obra vertical composta por nove pavimentos formado por: 3 Subsolos, que serão utilizados como estacionamento; 1 Térreo, que será acesso e lojas; 1 Mezanino para utilização das lojas; 3 Pavimentos residenciais de apartamentos e 1 Cobertura; além da caixa d'água inferior.

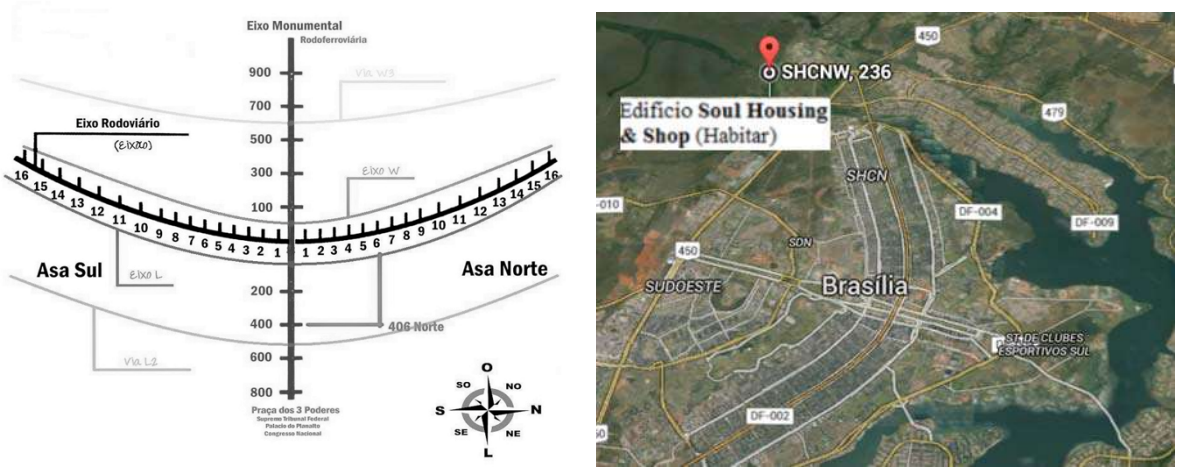


Figura 2: Representação do Plano Piloto e dos setores de Brasília (DF), destaque para o setor Noroeste, e a localização do novo empreendimento: Soul Housing & Shop no Noroeste [12].

Por se tratar de um bairro ecológico, as obras, realizadas no Setor Noroeste, seguem os procedimentos contidos no manual de sustentabilidade, denominado Manual Verde, desenvolvido pela TERRACAP - Agência de desenvolvimento do Distrito Federal [13]. Conforme apresentado no Manual, durante o planejamento executivo é necessário a apresentação dos planos de: erosão e sedimentação, gestão de resíduos, prevenção. Além, de um controle de poluição das atividades da construção e sua sustentabilidade ambiental respeitando o Plano de Gestão Ambiental de Implantação (PGAI), a licença de instalação, o Manual ambiental de construção e o próprio manual de sustentabilidade contidos no Manual Verde, específico para o Setor Noroeste.

O maior desafio do projeto de execução, do empreendimento, era a construção de uma laje de subpressão. Sendo necessária devido a presença de água no subsolo que, na ausência de bombas de sucção, poderia chegar até o 3° nível do subsolo. Para garantir a estanqueidade da laje foi adotado um sistema de impermeabilização, a partir de aditivos cicatrizantes, que apresentou um alto desempenho além de seguir os padrões ecológicos do bairro.

Em Brasília existe um grande problema relacionado ao descarte de materiais de construção. Visto que, não existem unidades de tratamento e destinação final adequados de resíduos da construção civil (RCCs). E materiais como o caso das mantas asfálticas, que são constituídas de compósitos petroquímicos, devem receber uma destinação adequada em conformidade com normas técnicas específicas (Conama 307/2002 [14]).

Neste sentido, uma das decisões importantes tomada durante o planejamento executivo da obra, para questões relacionadas a impermeabilização do concreto, como no caso da laje de subpressão, foi à adoção de um aditivo redutor de permeabilidade à pressão hidrostática (ARPH) junto à mistura do concreto. Evitando assim o uso de soluções tradicionalmente poluentes, como as mantas.

A laje de subpressão estanque em concreto armado, desse novo empreendimento, possui uma área de 2.500,00m^2, 30 cm de espessura, com um volume total de 750 m^3 de concreto para laje de subpressão e cortinas, e 500m^3 para blocos de fundação. E, em relação ao volume total de concreto utilizado, foram aplicados 3.000kg de aditivo ARPH para a construção da laje, que foi calculada com uma taxa alta de armadura de aço consumido no valor de 72.208Kg.

O traço do concreto, com propriedades autocicatrizantes, possuía relação água/aglomerante = 0,45 (170 litros de água), com classe de agressividade IV e consumo por m^3 de: 380 Kg de cimento CPIII - Cauê, 0,45Kg de fibra de polipropileno e 3,8kg de aditivo ARPH.

A concretagem total da laje de subpressão foi realizada em 3 etapas, com um intervalo de um mês entre elas. Sendo que, as etapas de concretagem foram ininterruptas de 4 horas, totalizando 12h para toda a sua execução. Como a construção foi feita em partes, juntas de concretagem foram confeccionadas para aderirem o concreto velho ao novo. Esta ponte de

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

aderência foi realizada por meio de uma fita hidroexpansiva flexível (Penebar SW 55-B), que foi aderida, cuidadosamente, a interface da junta fria através de uma emulsão de polímero acrílico (Penebar Primer).

A construção de lajes de subpressão em subsolos apresenta desafios durante a etapa de execução no que se refere a impermeabilização do concreto. Por estar submetida à uma constante pressão hidrostática da água, faz-se necessário a produção de um concreto menos poroso para reduzir a incidência da penetração da água a partir de fenômenos como absorção por capilaridade e permeabilidade da água (devido a pressão hidrostática, através dos poros ou das microfissuras). Sendo requisito a este tipo de estrutura apresentar uma durabilidade elevada.

2.2 Traço do Concreto e preparação

O concreto, para a laje de subpressão, apresentava as seguintes especificações técnicas, de acordo com o projeto estrutural e as recomendações do tecnologista:

- ✓ $f_{ck} \geq 35$MPa (aos 28dias de idade);
- ✓ relação água/cimento ≤ 0,60: de acordo com a classe de agressividade;
- ✓ teor de argamassa da ordem de 53 a 55%: para garantir um concreto coeso e com maior trabalhabilidade;
- ✓ slump de 18 ± 2cm: para melhor segurança na descarga e lançamento por bombeamento do concreto (fluido), em função da fibra de polipropileno aplicada;
- ✓ consumo mínimo de cimento = 350 Kg/m$^{3;}$
- ✓ diâmetro característico do agregado brita 1 com D < 19 mm;
- ✓ módulo de elasticidade mínimo na idade da desforma – E > 21 Gpa
- ✓ adição de ARPH (Penetron): para o processo de autocicatrização de fissuras;
- ✓ temperatura do concreto fresco ≤ 30ºC: para prevenção de fissuras de origem térmica;
- ✓ uso de fibras de polipropileno e evitar taxa de evaporação superior à 0,5 kg/m^2 de superfície exposta, por hora.

O ARPH foi dosado conforme as especificações do fabricante. No caso, foi utilizado o Penetron Admix, fornecido pela empresa Penetron®, na proporção de 0,8% em massa do consumo de cimento e adicionado durante a operação na central de mistura. Destaca-se que houve controle técnico deste teor, através de visitas do representante técnico à usina.

O concreto foi produzido conforme as prescrições da ABNT NBR 12655:2015 [15] e da ABNT NBR 7212:2012 [16]. O traço de concreto, tal como a procedência dos materiais empregados na concretagem da laje de subpressão, podem ser observados na Tabela 1.

Grandes áreas de concreto expostas, como no caso da laje em estudo, são particularmente vulneráveis aos problemas relacionados à retração por secagem e à temperatura. A especificação técnica para recebimento do concreto em obra foi da ordem de 28ºC à 30ºC de temperatura, em função de quatro parâmetros: umidade relativa, temperatura do próprio concreto, velocidade do vento e temperatura do ar. Na prática, essa temperatura oscilou em 28 ± 2ºC, em dias com temperatura ambiente em média de 30ºC. Mesmo nos dias mais quentes a diferença de temperatura não ocasionou fissurações térmicas.

A taxa de evaporação foi especificada na faixa de até 0,5kg/m^2 de superfície exposta por hora para minimizar o efeito da retração por secagem nas primeiras idades, conhecidas como retrações plásticas, e que podem ocasionar fissuração no concreto.

Tabela 1 – Composição do concreto utilizado na laje de subpressão.

Materiais	Consumo/m³
CP III-40 RS – Cauê (Intercement) consumo de cimento por m³	380 kg
Areia Quartzo (Areia de Cava Quartzosa - Sobradinho-DF MF = 1,07)	384 kg
Areia Britada ((Mineração Calcário - Sobradinho-DF MF = 2,95)	415 kg
Brita 0 (Mineração Calcário - Sobradinho-DF)	205 kg
Brita 1 (Mineração Calcário - Sobradinho-DF)	818 kg
Água de amassamento	170 kg
Aditivo plastificante polifuncional (829 SPX, Grace)	1,9l kg
Aditivo superplastificante (Tecflow 50N, Grace)	1,5l kg
Aditivo redutor de permeabilidade hidrostática (Penetron Admix)	3,04 kg
Fibra de Polipropileno Neomatex	0,45 kg
Ar aprisionado considerado na mistura	2,0%

O aditivo superplastificante utilizado tinha como objetivo prolongar a trabalhabilidade do concreto, proporcionando uma boa fluidez para o bombeamento, conforme o slump inicial (18 ± 2cm) esperado, antes da pega. A obra, por estar localizada numa área residencial, precisava realizar todo o lançamento do concreto até as 22h, período permitido à circulação de caminhões betoneira até às 22h. Sendo assim, o superplastificante ao produzir um concreto mais fluido, sem perder na coesão, permitiu uma maior agilidade durante o lançamento.

Em todas as 3 etapas, a concretagem foi iniciada às 16h, com o objetivo de reduzir potencial de retração térmica do concreto. Interrupções programadas na concretagem foram realizadas e as marcas de juntas entre as camadas sucessivas de concreto foram tratadas com a instalação da fita hidroexpansiva (Penebar SW55 – B). Trata-se de um material hidrofílico, que se expande, de forma controlada e lenta, quando exposto a umidade ocasiona um selamento nas juntas.

2.3 Procedimentos de Concretagem

Para a execução da laje de subpressão foi utilizado um concreto pré-misturado, produzido nas centrais da Concrecon – Concreto e Construções Ltda., com rigoroso controle de qualidade. De acordo com as especificações do projeto de execução, a laje, com 750m³ de concreto, deveria ser executada em 3 etapas paralelas. E, na interface de cada etapa da laje deveria ser executado as juntas de concretagem.

O volume máximo de concreto, em cada etapa, era da ordem de 270m³ (27 caminhões betoneiras por etapa, aproximadamente). O tempo médio para recebimento e descarga de cada caminhão betoneira foi, aproximadamente, de 15minutos. A produção efetiva por etapa foi de 67,5m³/h, isto é, foram lançados em média 750m³ de concreto, em aproximadamente, 12h de execução.

Vale ressaltar que em todo o lote, de concreto usinado, foi verificado tanto a temperatura quanto o abatimento, durante a chegada dos caminhões e depois do seu lançamento. A medição da temperatura de chegada do concreto foi realizada em todos os caminhões betoneiras com termômetro digital de vareta (Figura 3a). Com este tipo de termômetro é possível realizar a medição da temperatura em todo o volume de concreto, e não apenas superficialmente, como é o caso do termômetro a laser.

Como o intuito era evitar a fissuração da laje, a concretagem foi realizada no período noturno reduzindo os picos de temperatura alta ao longo do dia além disso os balões dos caminhões betoneiras foram resfriados externamente com água corrente. Somado a isso, os agregados e o cimento foram estocados por mais de 24h, as britas e as areias foram protegidas do sol e molhadas, constantemente. Desta forma, foi possível garantir que a temperatura do concreto lançado não ultrapassasse a temperatura limite de projeto de 30ºC, para evitar ao máximo a fissuração por temperatura.

Após o lançamento do concreto, a medição da temperatura no seu interior foi realizada utilizando sensores termopares, que consistem na colocação de fios, no interior do concreto, para posterior medição da temperatura com equipamento específico (Figura 3b e 3c). Esse procedimento fornece a temperatura real dos pontos desejados no interior do concreto, diferentemente dos ensaios realizados com medições realizadas superficialmente, e podem sofrer influência da temperatura externa. A medição do concreto ocorreu utilizando um *Data Logger,* que realiza a medição de temperatura automaticamente, a cada 60 minutos, permitindo avaliar toda a elevação ocorrida no interior do concreto nas próximas 24h, bem como o seu valor máximo (Figura 3).

Abril de 2016
ISSN 2448-1459



(a) (b) (c)

Figura 3: Medições da temperatura no concreto, em dois momentos distintos: a) nos caminhões, a partir de um termômetro digital de vareta; b) no lançamento, a partir de sensores termopares e c) instalação dos fios do termopar no interior do concreto.

O slump teste foi realizado através do ensaio de abatimento pelo tronco de cone (norma ABNT NBR NM 67:1998 [17]) para confirmação das características de fluidez requeridas: 18cm (slump). Foram aceitas variações na faixa de até +/- 2cm. Além disso, foi realizada uma análise visual nos lotes para verificar indícios de segregação.

O lançamento do concreto ocorreu por meio de bombeamento utilizando duas bombas (uma de reserva) através de tubulações para grandes distâncias, tanto horizontais quanto verticais (Figura 4), devido ao difícil acesso ao local da concretagem, localizado à 9,82m abaixo do nível da rua. Em relação aos constituintes do concreto, foi assegurado uma granulometria contínua dos agregados para garantir menos atrito nas paredes da tubulação e um teor mínimo de vazios na mistura. De acordo com Neville *et al* [18], esta é a situação ideal para se ter um concreto bombeável de qualidade, evitando a excessiva resistência devido ao atrito na tubulação ou a segregação da mistura.



Figura 4: Lançamento do concreto na 1° etapa da laje , a partir de tubulações de grande alcance.

As operações de lançamento e adensamento foram executadas quase simultaneamente. O concreto foi lançado verticalmente em camada uniforme, com espessuras de 30cm. O adensamento foi realizado através de quatro vibradores de imersão, além de outros 3 vibradores reserva, e seguiu os preceitos da ABNT NBR 14931:2004 [19]. Com os devidos cuidados para que o vibrador permanecesse na posição vertical, durante o adensamento, além de evitar a vibração da armadura para que não se formem vazios ao seu redor, com prejuízos da aderência.

As juntas de concretagem, formadas na região de ligação entre as três partes da laje, eram os pontos de maior atenção para se garantir a estanqueidade da estrutura. A fita hidroexpansiva foi instalada minutos antes do início da etapa seguinte de concretagem, sendo aplicada no meio da espessura da laje anterior, por todo o seu comprimento.

A cura do concreto, para as três etapas, foi cuidadosamente planejada e executada, iniciando logo após ao término das operações de lançamento e adensamento do concreto. É vital para a durabilidade do concreto, garantir que a sua cura aconteça até que os capilares, na pasta de cimento hidratada, se tornem segmentados. Para esta condição, é necessário o controle da taxa de evaporação da água superficial do concreto, que depende de variáveis como: temperatura, umidade relativa do ar no local, velocidade do vento.

Para se conseguir essa condição na obra, foi realizada a pulverização de água sobre a superfície do concreto, como demonstrado na Figura 5-a, logo após a etapa de acabamento. Esta névoa úmida auxilia na perda de água para o meio ambiente e não ocasiona prejuízo à concretagem, contribuindo com o aspecto visual final da laje além de minimizar o risco de fissurações.

A cura úmida foi iniciada a partir do endurecimento superficial do concreto, através de uma análise tátil-visual. O procedimento para a cura se deu através do represamento de uma lâmina de água (h ± 5cm) por no mínimo 7 dias (Figura 5-b).



(a) (b)

Figura 5: Detalhes do tipo de cura: a) Pulverização de água no concreto b) Selamento da superfície do concreto com lâmina de água constante.

Durante a concretagem dessa laje de subpressão, foram empregados alguns procedimentos relevantes, e que merecem destaque, tais como:

- ✓ Para garantir a integridade e o posicionamento da armadura inferior da laje, preparou-se um concreto magro de fck = 15Mpa, brita 1, com slump de 10 ±2cm, executado antes da concretagem estrutural (Figura 6-a);
- ✓ Nas juntas de concretagem, ao longo de todo o seu comprimento, foi utilizado uma tela de aço galvanizado para melhorar a rugosidade e auxiliar o adensamento do concreto nesta região.
- ✓ A fita hidroexpansiva (Penebar SW55 - B) foi instalada ao longo da interface da camada já concretada (ao meio da espessura de cada parte da laje) e alguns instantes antes da concretagem (Figura 6-b);
- ✓ No tratamento das juntas de concretagem, para evitar o deslocamento da fita hidroexpansiva durante o lançamento do concreto, foi utilizado um primer à base de emulsão acrílica (Penebar Primer), que melhora a aderência entre a fita e a superfície do concreto (Figura 6-c);
- ✓ Na ponte de ligação, entre os concretos de idades distintas, foi aplicado o aditivo autocicatrizante (Penetron Admix) com o traço, em volume, 1(água): 2,5(Penetron), e também na base dos pilares. Essa aplicação foi realizada no máximo 20 minutos antes do lançamento do concreto novo (Figura 6-d);
- ✓ Para garantir uma umidade acima de 50%, durante a concretagem, foi utilizada uma lavadora de alta pressão, para realizar a "nebulização" na região da concretagem;
- ✓ Após o endurecimento do concreto (tátil-visual) as cortinas foram cobertas com manta (Bidim) úmida de água no mínimo 7 dias, mantendo o cuidado saturá-las com água potável durante todo o período de cura;
- ✓ Verificação do concreto, em relação a presença de ARPH (Penetron), a partir do rastreador presente na sua composição, que devido a sensibilidade aos raios UV torna a água de exsudação com a coloração "amarela-fluorescente" (Figura 6-e);
- ✓ Durante a chegada de cada caminhão betoneira à obra, foi realizado o controle tecnológico do concreto, a partir de uma empresa acreditada do Inmetro e não vinculada à concreteira (Figura 6-f).



a) Detalhe do concreto magro executado.



b) Detalhe da fita hidroexpansiva flexível instalada na interface da junta.



c) Detalhe do primer (tom laranja) para fixação da fita hidroexpansiva na junta das cortinas.



d) Aplicação do aditivo autocicatrizante na base dos pilares.



e) Detalhe do rastreador primer (tom amarelo-fluorescente).



f) Controle tecnológico do concreto realizado em todos os caminhões, antes do lançamento.

Figura 6: Detalhamento dos procedimentos considerados relevantes durante a concretagem da laje de subpressão.

3. RESULTADOS

3.1 Controle Tecnológico do Concreto

O recebimento e controle do concreto foi executado seguindo as prescrições da norma ABNT NBR 12655:2015 [15]. Para a aceitação provisória, foram verificadas as propriedades do concreto fresco pelo ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone em cada lote. Todos os valores obtidos neste ensaio ficaram dentro da especificação de 18 ± 2 cm.

Para a aceitação definitiva do concreto, foram moldados quatro corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm de cada caminhão betoneira, seguindo a norma ABNT NBR 5738:2015 [20]. O ensaio de resistência à compressão foi realizado nessas amostras aos 7 e 28 dias de idade, conforme a ABNT NBR 5739:2007 [21]. O concreto foi aceito, porque o valor

da resistência característica estimada (f_{ckest}) atendeu a prescrição normativa da relação: $f_{ckest} \geq f_{ck}$, em cada uma das amostras coletadas.

3.2 Controle de Temperatura

De acordo com as especificações técnicas do projetista e do tecnologista, foi feito o controle da temperatura. Inicialmente, para o recebimento e aceitação do concreto na obra, a temperatura foi medida por meio do termômetro digital de vareta (Figura 3-a). Na figura 7 são mostrados os valores da temperatura coletados dos caminhões betoneiras das três etapas, que conformaram a concretagem da laje de subpressão.

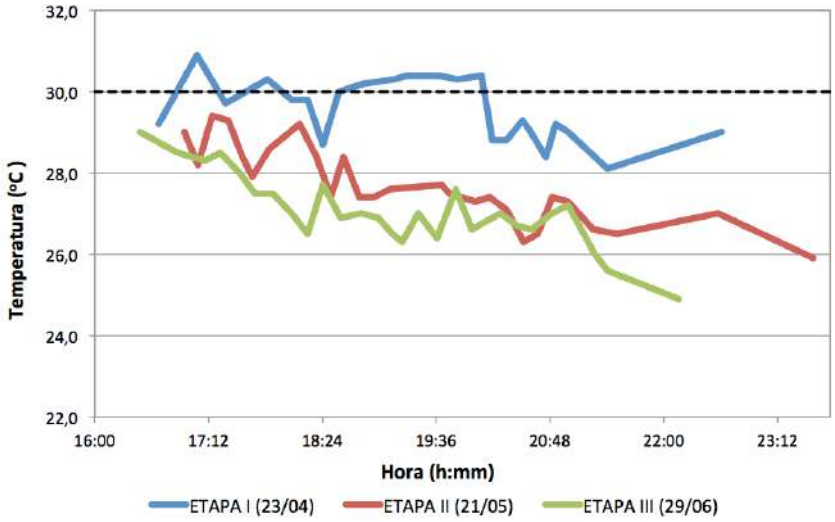


Figura 7: Valores da temperatura de lançamento do concreto na obra.

Conforme a figura 7, somente na primeira etapa de concretagem a temperatura de lançamento superou os 30ºC. Durante o tempo de concretagem a temperatura ficou abaixo dos 31ºC, não comprometendo as operações de lançamento do concreto. Também pode ser observada a tendência da diminuição da temperatura com o tempo para cada etapa de execução. Esta tendência era esperada pois foi atendida a recomendação de que o concreto fosse lançado no final da tarde, evitando assim a fissuração térmica.

Posteriormente, a evolução da temperatura ao longo do tempo foi monitorada a partir da instalação de dois termopares (*Data Logger*) no concreto da laje em cada uma das etapas de concretagem. Estes sensores permitiram avaliar a elevação de temperatura ocorrida no interior do concreto, durante as primeiras 24h, bem como identificar o seu valor máximo (Figura 8).

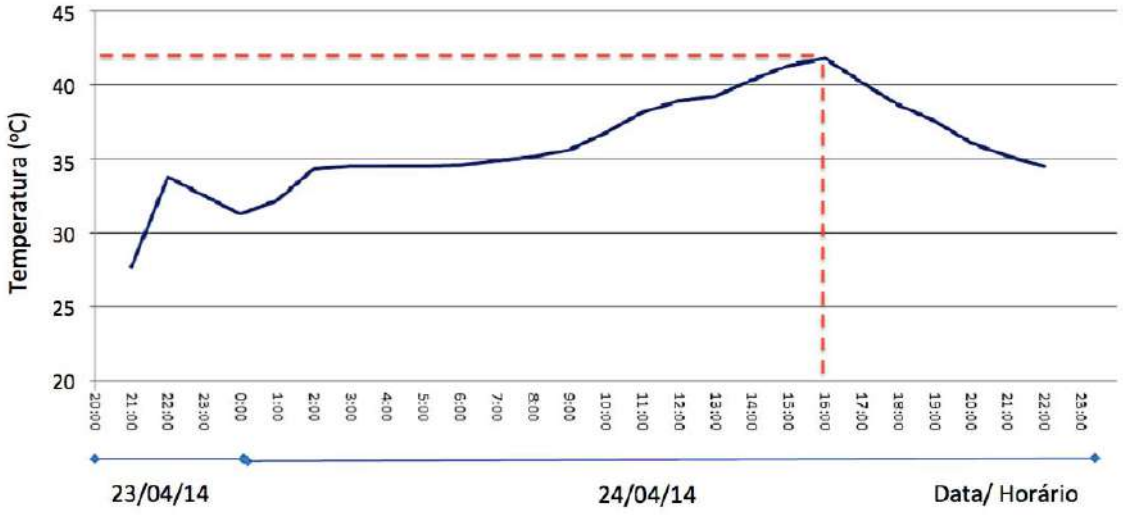


Figura 8: Evolução da temperatura da camada de concreto ao longo do tempo [22].

Na Figura 8 é apresentada a curva de evolução da temperatura, no ponto mais crítico, que registrou os maiores valores (etapa I – termopar 2). Neste caso, a temperatura máxima do concreto foi de 41.8°C, medida após 19 horas do lançamento do concreto. A temperatura máxima registrada pelos sensores foi menor que o limite estipulado (60ºC) para impedir os possíveis problemas por fissuração térmica. Portanto, pode-se que concluir que todas as estratégias usadas para o controle tecnológico foram satisfatórias.

3.3 Estanqueidade

Segundo Britez *et. al* [3], a estanqueidade de uma estrutura de concreto pode ser entendida como a capacidade dessa estrutura de não permitir a percolação de líquidos, por nenhuma das paredes, juntas ou lajes que os confinam. Com o objetivo de avaliar essa propriedade, mesmo com os resultados obtidos da temperatura, foi feita uma inspeção visual ao longo das etapas da laje de subpressão. E constatou-se que não houve fissuração de origem térmica ou por retração, inclusive em regiões mais críticas como a caixa d'água, que se localizava no nível mais baixo da obra, à -3,68m abaixo do nível superior da laje de subpressão. Além disso, não se apresentaram problemas de vazamento ou percolação de água na laje ou nas cortinas do projeto, como mostra a Figura 9.



Figura 9: Laje de subpressão e cortinas laterais.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio do cumprimento das especificações de projeto, assim como das recomendações do tecnologista sobre: o traço de concreto, a adição de aditivo redutor de permeabilidade, as atividades de controle tecnológico e procedimentos construtivos; foi possível alcançar um elemento estrutural integro e estanque (sem fissuração de origem térmica o por retração). Não sendo necessário realizar qualquer outro procedimento de impermeabilização, após a cura do concreto, diminuindo os custos de manutenção. Mostrando que o uso do ARPH é uma alternativa viável em obras com elevados requerimentos de estanqueidade e durabilidade.

Considera-se que os procedimentos executivos apresentados ao longo do artigo estão de acordo com as normas prescritas e podem ser considerados como boas práticas para futuras obras similares.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Construtora Habitar Empreendimento Imobiliários por permitir o desenvolvimento deste trabalho, pelo apoio e colaboração no repasse de informações. E a Penetron Brasil Ltda, a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao CNPq pelo apoio financeiro.

6. REFERÊNCIAS

[1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto: Procedimento*. Rio de Janeiro, 2014. 221p.

[2] LEMA, D. *et al*, *Durabilidade das estruturas pela impermeabilização por cristalização integral do concreto.* Rev. CONCRETO e Construções. [online]. 2015, vol.77, pp. 94-102. ISSN 1809-7197.

[3] BRITEZ, C. *et al, Estanqueidade de lajes de subpressão. Caso MIS-RJ*. Rev. IBRACON Estrut. Mater. [online]. 2014, vol.7, n.6, pp. 913-921. ISSN 1983-4195.

[4] TAKAGI, E. M. *Concretos autocicatrizantes com cimentos brasileiros de escória de alto-forno ativados por catalisador cristalino.* 2013. 130 f. Dissertação de mestrado em Engenharia de Infraestrutura Aeroportuária – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

[5] OURIVES, C. N. *et al, Estudo de Caso: Impermeabilização do subsolo do condomínio Adelaide.* 13° Simpósio Brasileiro de Impermeabilização. São Paulo, 2013. 11p.

[6] RILEM. *Self-healing phenomena in cement-based materials*. Heidelberg: Springer Netherlands, v.11, 2013.

[7] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. *ACI 212.3R-10: Report on Chemical Admixtures for Concrete*. USA, 2010.

[8] ALMEIDA, I. R. de. *A onda de concreto que flutua no M.A.R.* Rev. CONCRETO e Construções. [online]. 2013, vol.72, pp. 100-110. ISSN 1809-7197.

[9] DUVIVIER, J. G., SANSON, M., Art of Travel. Disponível em: http://www.artoftravel.com.br/web/dt_portfolio/mar-museu-de-arte-do-rio/. Acesso em 4 de fevereiro de 2016.

[10] DILLER E. *et al.,* Concurso Internacional – Museu da Imagem e do Som – Rio de Janeiro. Disponível em: https://concursosdeprojeto.org/2009/08/07/concurso-mis-rj-finalistas/. Acesso em 4 de fevereiro de 2016.

[11] MINAS ARENA. Estádio Governador Magalhães Pinto. http://www.minasarena.com.br/mineirao/esplanada/. Acesso em 4 de fevereiro de 2016.

[12] BRASÍLIA - DF. Representação do Plano Piloto e dos setores de Brasília (DF). https://www.google.com.br/maps/place/SHCNW,+236+-+Bras%C3%ADlia,+DF/@-15.7827242,-47.9223263,14824m/data=!3m1!1e3!4m2!3m1!1s0x935a39fa751587b7:0x5a97c6d8c546424e!6m1!1e1?hl=es. Acesso em 4 de fevereiro de 2016.

[13] TERRACAP, Companhia Imobiliária de Brasília. *Manual Verde Noroeste. Plano de Gestão Ambiental de Implantação*. Manual Ambiental de Construção (PGAI). Licença de Instalação. Brasília, jan. 2009.

[14] CONAMA, Conselho Nacional Do Meio Ambiente. *RESOLUÇÃO CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002*. Brasília, 2002.

[15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12655: concreto de cimento Portland - Preparo, controle e recebimento: Procedimento*. Rio de Janeiro, 2012. 18p.

[16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7212: Execução de concreto dosado em central:Procedimento*. Rio de Janeiro, 2012. 16p.

[17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. Rio de Janeiro, 1998. 8p.

[18] Neville, A.M. *et al*, Tecnologia do Concreto. 2ª ed. BOOKMAN, 2013, pp. 448.

[19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 14931: Execução de estruturas de concreto: Procedimento*. Rio de Janeiro, 2004. 53p.

[20] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*. Rio de Janeiro, 2015. 9p.

[21] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5739: Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, 2007. 9p.

[22] MM ENGENHARIA. *Relatório Técnico Medição de Temperatura Da Laje De Subpressão*. Brasília-DF, 2015.