



Anais do
60º Congresso Brasileiro do Concreto
CBC2018
Setembro / 2018



@ 2018 - IBRACON - ISSN 2175-8182

A TECNOLOGIA DE CONCRETO APLICADA AO SISTEMA DE BLINDAGEM DE UM ACELERADOR DE PARTÍCULAS – PLANEJAMENTO E ESTUDO DE DOSAGEM PARA O PROJETO SIRIUS.

Concrete technology applied to the radiation shielding of a particle accelerator - planning and mix design studies for the Sirius Project

Autores:

(1) Roberto Dakuzaku – rdakuzaku@stakashima.com.br, Sócio IBRACON nº 25111808467, (2) Oscar Horácio Vigna Silva – oscar.vigna@Inls.br, (3) Paulo Bina - pbina@monobeton.com.br, (4) Selmo Chapira Kuperman – selmo@desek.com.br, Sócio IBRACON nº 25101708225, (5) Eduardo Funahashi Jr. – eduardo.desek@gmail.com, Sócio do IBRACON: 25400906395 (6) Júlio Rodrigues – julio.rodrigues@racional.com

(1) S. Takashima Consultoria e Assessoria Ltda., (2) Laboratório Nacional de Luz Síncrotron LNLS – Infraestruturas Especiais, (3) Monobeton Soluções Tecnológicas Ltda., (4) Desek Ltda, (5) Desek Ltda., (6) Racional Engenharia Ltda.

Resumo:

Apresentar as especificações e a tecnologia de concreto aplicadas nas concretagens do sistema de pisos e túnel de blindagem do acelerador de partículas do Projeto Sirius – CNPEN – Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais. O desafio para a tecnologia do concreto foi – a partir das especificações e premissas de controles dimensionais e de vibração - selecionar materiais regionais, estudar e dimensionar as dosagens para atender especificações do projeto, entre estas - retração na idade de 28 dias de 0,02%, ter boa trabalhabilidade para execução dos pisos especiais com espessuras de 60cm e 90cm e atender índices de planicidade e nivelamento. A instalação de medidores de temperatura e de tensão nas peças, para a verificação de comportamento desses concretos na obra efetiva, possibilitará realimentar o processo para os devidos ajustes de correções e melhorias, além de inspeções frequentes de eventuais ocorrências. As principais observações e conclusões, bem como sugestões de estudos complementares e a disponibilidade de dados, como principais resultados deste trabalho, possibilitam a verificação de conceitos avançados da tecnologia de concreto e seu comportamento a curto, médio e longo prazo.

Palavra-chave: Projeto Sirius, acelerador de partículas, concreto refrigerado e reforçado com macrofibra polimérica, estudo térmico e retração, fissuração

Abstract

This paper presents the concrete specifications and technology applied for construction of the floor and shielding tunnel of the Particle Accelerator System at Sirius Project / CNPEN. The concrete technology challenge was, from the specifications and premises of dimensional controls and vibration: - select regional materials, concrete study and mix design to comply with project specifications, among them, 0,02% maximum of drying shrinkage at the age of 28 days, good workability for the construction of special floors with thicknesses of 60cm and 90cm and complying with levels of flatness and leveling and control



the concrete production and quality during the construction period. The installation of temperature and strain meters in the parts, to verify the effective behavior of these concretes in place, will allow to feed back the process for the correct adjustments of corrections and improvements, as well as frequent inspections of eventual occurrences. The main observations and conclusions, as well as suggestions for complementary studies and the availability of data, as the main results of this work, allow the follow up of advanced concepts in concrete technology and its behavior in the short, medium and long term.

Keywords: Sirius Project, particle accelerator. refrigerated concrete reinforced with polymeric macrofiber. thermal study and shrinkage, cracking

1. Projeto Sirius

O **Laboratório Nacional de Luz Síncrotron opera, na cidade de Campinas-SP desde 1997, a única fonte de radiação síncrotron da América Latina.** Importante projeto científico civil brasileiro, foi responsável por alavancar a ciência brasileira, formando uma comunidade de pesquisadores que em grande parte, migrou para outros centros ao redor do mundo com instalações mais avançadas.

O Projeto Sirius nasceu da necessidade de tornar a ciência brasileira competitiva e se propôs em 2012, a construir uma fonte de quarta geração. À época, apenas na Suécia estava em fase de construção a primeira fonte desta geração que é, até hoje, a única em operação no mundo.

O que caracteriza as fontes de quarta geração é a ultra-baixa emitância dos feixes de radiação eletromagnética (abaixo de 1nm.rad) obtidos por aceleração de feixes de elétrons em alta energia com dimensões na ordem de micrometros em equipamentos com centenas de metros de circunferência. A estabilidade da trajetória destes elétrons, na ordem de centenas de nanômetros (milionésima parte do milímetro), exigem ambientes extremamente estáveis do ponto de vista mecânico.

No caso do Sirius as especificações apresentadas aos projetistas, consultores e construtores foi de um edifício capaz de propiciar à instrumentação científica a ser nele instalada, estabilidade adequada e alta disponibilidade, além da necessária proteção radiológica para tornar o seu entorno seguro para a permanência humana.

Dentre as partes críticas da edificação, o piso especial e a blindagem dos aceleradores foram os grandes desafios de engenharia na área de concreto. Entre as principais exigências citamos as seguintes:

- Piso Especial:
 - Nivelamento de piso com tolerância de $\pm 10\text{mm}$ em torno de seu nível de referência;
 - Deformação da superfície de no máximo 0,25mm a cada 10m durante 1ano;
 - Ausência de fissuras.
- Blindagem:
 - Ausência de fissuras;
 - Controle dimensional das paredes internas e de locação de alguns furos com tolerância de 10mm.

Os números não seriam tão desafiadores se tanto o piso como a blindagem não compusessem, cada qual, uma única peça de concreto com circunferência média de 520m.



Figura 1 - Edifício Sirius – Maio 2018, figura 2: Piso especial destinados às linhas de luz na área de ensaios e túnel de blindagem. Arquivo pessoal: Xavier, L.S.

1.1. Túnel de blindagem dos aceleradores

No interior do túnel de blindagem, serão construídos o acelerador injetor (Booster) e o Anel de Armazenamento, ou seja, os equipamentos em que os elétrons são acelerados e a luz síncrotron é produzida. A blindagem proporcionará tanto a devida estabilidade dimensional e mecânica aos equipamentos, como garantirá a segurança radiológica das dependências do Sirius.



Figura 2 - O túnel de blindagem está construído sobre um piso monolítico de concreto armado com 90 centímetros de espessura e suas paredes e coberturas espessas, também em concreto armado com espessura variável entre 80 centímetros e 150 centímetros. Toda a blindagem será construída sem juntas de dilatação e constituirá, ao término da concretagem, em uma peça única com 520 metros de comprimento.

2. Concepção e fundamentos das estruturas do túnel de blindagem e piso especial

O desempenho mínimo esperado para obras similares sempre foi de muito baixa vibração e deformações, para que a projeção da luz irradiada pela aceleração das partículas, projete em anteparos a distâncias variadas – linhas curtas, médias e longas, as características desejadas de identificação dos átomos dos componentes em teste.

Para tal, as exigências tornam-se cada vez mais restritivas, pelo incremento da potência de emissão da luz que ultrapassando o material em teste, identifique seus compostos.

Assim, tanto a nível de base de apoio dos pisos que compõem o sistema do túnel do acelerador, como dos pisos e bases em que são fixados os anteparos de determinação da imagem da luz projetada que ultrapassa o material sob análise, devem estar com desempenho adequado.

Sob o túnel do acelerador, foram estudadas as condições geológicas do solo em suas inúmeras camadas, buscando-se base de apoio com capacidade de minimizar as vibrações das camadas superiores – vibrações estas das diversas atividades próximas (tráfego de veículos ou pessoas nos pisos e pavimentos próximos, tráfego de caminhões na rodovia a

cerca de 2km de distância, movimentos sísmicos por obras ou equipamentos de empresas vizinhas, e até sismos em outras regiões ou países próximos), e estruturação das camadas mais elevadas – no caso a cerca de 3,5m de profundidade até o nível de instalação dos blocos de apoio do acelerador. No desenho esquemático abaixo tem-se uma breve descrição dessa estruturação.

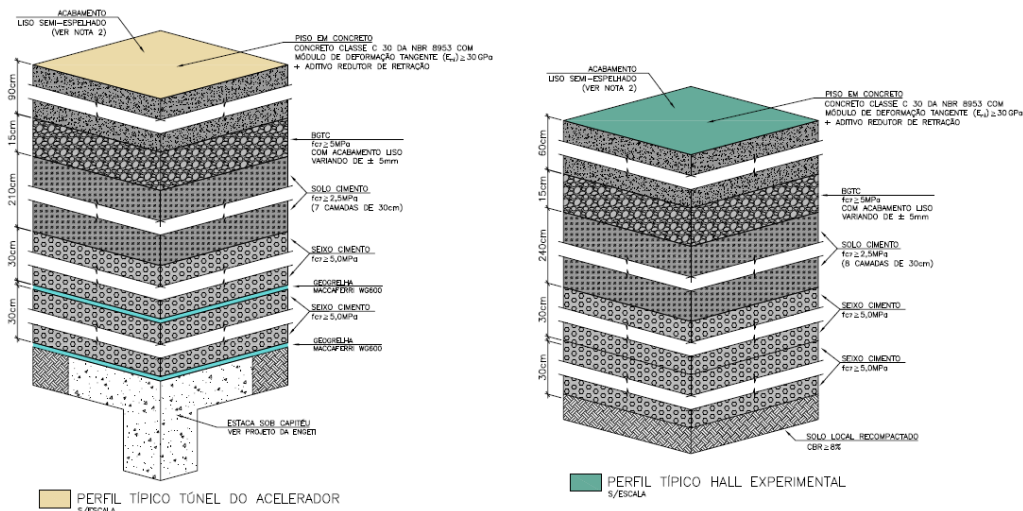


Figura 3 - Estrutura dos pisos especiais.

Os pisos sob o túnel do acelerador são de espessura 90cm, para garantia da rigidez contínua entre cada bloco de apoio do mesmo, e para minimizar os efeitos de vibração das atividades do próprio centro, como o simples andar de técnicos nas linhas de pesquisa próximas. Nesta etapa utilizou-se cerca de 6.800m³ de concreto.

Já nas áreas de ensaios, os pisos são compostos de concreto armado com espessura de 60cm, e juntas que garantam que a projeção da luz de teste não coincida ou ultrapasse uma junta susceptível a movimentações térmicas ou higroscópicas. Nos pisos de 60cm foram utilizados cerca de 5.800m³ de concreto.

Para os túneis, com espessuras de até 1m, foram utilizados cerca de 7.000m³ de concreto. O sistema como um todo foi testado em uma obra denominada Cruzeiro do Sul, comparando-se o modelo mais recente – e suas características de vibração e movimentações, com o modelo ora proposto para o Brasil, inclusive com a especificação básica do concreto a ser utilizado.

Após mais de 3 anos de projetos e do teste, foram iniciadas as obras.

Para a instalação do LINAC – etapa de início de condução das partículas para o acelerador circular, foi utilizado cerca de 420m³ de concreto de consistência auto adensável, pelas condições de impossibilidade de concretagem direta, pois encontra-se sua laje sob área de edificações previamente construídas.

3. Etapas preliminares, planejamento das atividades para estudo do concreto das estruturas das edificações de missão crítica

Nas etapas preliminares, foi importante as reuniões na obra e formação de um comitê técnico composto por representantes do cliente, da construtora, da gerenciadora, do fornecedor de concreto e especialistas nas competências de projeto estrutural, projeto de ANAIS DO 60º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2018 – 60CBC2018

piso, tecnologia de concreto, formas, juntas de dilatação, instalações embutidas no concreto e execução de piso industrial para estabelecer os objetivos e procedimentos executivos necessários para entregar resultados de acordo com as exigências de projeto e do usuário, quanto à necessidade fundamental de obter estabilidade dimensional, térmica e vibracional do túnel de blindagem.

4. Estudo de dosagem do concreto

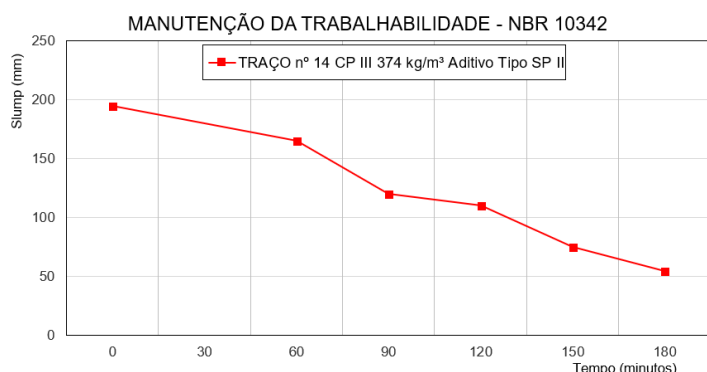
Dados de entrada, especificados em projeto, adotados para definir os estudos de dosagens e qualificação de fornecedores de ingredientes dos traços:

- Concreto classe de resistência C 30 – f_{ck} 30MPa, módulo de deformação tangente inicial E_{ci} $0,3f_{ck} \geq 30GPa$, retração por secagem do concreto $\leq 0,02\%$, teor de ar incorporado $\leq 3\%$, índice de exsudação $\leq 2\%$, abatimento do concreto fresco classe S160, dimensão máxima do agregado graúdo 19mm;
- Emprego de cimento de baixo calor de hidratação, tipo CP III ou CP IV, consumo mínimo 350kg/m³;
- Adições: Macrofibra polimérica álcali resistente, finalidade sem função estrutural, porém, reforçar o concreto de elementos espessos, controlar e diminuir abertura de fissuras. Compensador de retração a base de óxido de cálcio, Tipo G;
- Temperatura de controle de recebimento do concreto inferior a 20°C, temperatura máxima atingida pelo concreto endurecido 50°C, (posteriormente este limite foi estendido para 65°C, temperatura aceitável, para eliminar a possibilidade de eventual formação de estringita tardia (DEF) no futuro, patologia que já se manifestou em construções de algumas regiões do Brasil e pode causar deterioração de peças de concreto).

Após análise dos tipos de cimento disponíveis na região da obra, foi escolhido o cimento tipo CP III 40 RS, fabricado em Santa Helena, por ser de baixo calor de hidratação e apresentar menor retração por secagem em relação aos outros tipos de cimentos disponíveis, os tipos CP II E 40 e CP IV 32, ensaios disponibilizados pelo fabricante.

Amostras de agregados miúdo, areia fina natural quartzosa, extraído de cavas, areia artificial de rocha calcário da região de Santana do Parnaíba e agregados graúdos de rocha basalto da região de Paulínia, foram submetidas a ensaios de caracterização física e de reatividade potencial álcali-agregados “RAA” cujos resultados satisfatórios e potencialmente inócuos foram misturados e a melhor combinação granulométrica foi escolhida para o desenho dos traços estudados.

Figura 4 – Curva de manutenção da trabalhabilidade do concreto refrigerado do traço nº 14 definiu os ajustes e qualificação do aditivo superplastificante a base de éter policarboxilato de terceira geração tipo SP II conferindo ao concreto fresco ajustado tempo de manutenção da trabalhabilidade desde a saída da central até o término das operações de lançamento, adensamento e acabamento dos pisos especiais e do concreto aparente das paredes do túnel de blindagem.



Após qualificação dos ingredientes e dos fornecedores, os traços aprovados foram:

Traço nº	fck (MPa)	Módulo Eci 0,4fck (GPa)	Classe de consistência Abatimento/ Espalhamento (mm)	Temperatura do concreto fresco (°C)	Aplicação	Cimento CP III 40 RS (kg/m³)	Óxido de cálcio (kg/m³)	Areia fina de Quartzo (kg/m³)	Areia artificial Calcário (kg/m³)	Brita 0 Basalto (kg/m³)	Brita 1 Basalto (kg/m³)	Macrofibra polimérica (kg/m³)	Água/ Gelo (kg/m³)	Aditivo 1 Tipo SP II (kg/m³)	Aditivo 2 Estabilizador Tipo AEH (kg/m³)
11'	30	30	S160 160 a 220	18±3	Túnel de Blindagem Concreto Aparente	350	15	588	277	396	735	4,0	50/100	3,8	-
14'	30	30	S160 160 a 220	18±3	Piso Especial Tipo A e Tipo B Acabamento mecanizado	374	12	567	267	401	744	4,0	50/100	3,2	-
22'	30	30	CAA SF2 660 a 750	18±3	Túnel de Blindagem LINAC Concreto Aparente	374	15	621	292	352	654	Microfibra de Vidro AR = 4,0	78/90	4,5	0,6

Resultados dos ensaios dos estudos de traços em laboratório:

- Resultados dos ensaios no concreto fresco:

Traço	Aplicação	Abatimento NBR NM 67 (mm)	Espalhamento NBR15823-2 (mm)	Ar incorporado NBR NM 47 (%)	Temperatura do concreto fresco (°C)	Massa unitária (kg/m³)	t500 NBR 15823-2 (s)	Anel J NBR 15823-3 (mm)	Caixa L (H2/H1) NBR 15823-4	Funil V NBR 15823-5 (s)	Caixa U EFNARC 2002 (mm)
D11'	Túnel	175	-	2,7	17,4	2500	-	-	-	-	-
D22' CAA	Túnel Linac	-	695	1,7	16,0	2479	2,52	15	0,89	9,6	11
D14'	Piso	160	-	2,2	15,8	2534	-	-	-	-	-

- Resultados dos ensaios no concreto endurecido:

Traço	Aplicação	Resistência à compressão NBR 5739 (MPa)				Tração por compressão diametral NBR 7222 (MPa)			Tração na flexão NBR 12142 (MPa)			Módulo de deformação tangente Eci 0,3fck NBR 8522 (GPa)		
		R1	R3	R7	R28	R2	R4	R7	R3	R7	R28	E3	E7	E28
D 11'	Túnel	15,0	38,1	52,7	72,3	3,7	5,6	6,8	-	-	-	33,6	E6= 42,2	-
D 22' CAA	Túnel Linac	0,6	R5=37,1	45,9	74,1	-	-	-	-	-	-	-	35,7	43,3
D1 14	Piso	20,4	R2=32,5	58,2	80,7	3,5	5,2	5,5	-	7,85	9,47	31,0	42,9	48,0

(1) Número de dosagem da tabela de traços aprovados CT0030-1-REV-31



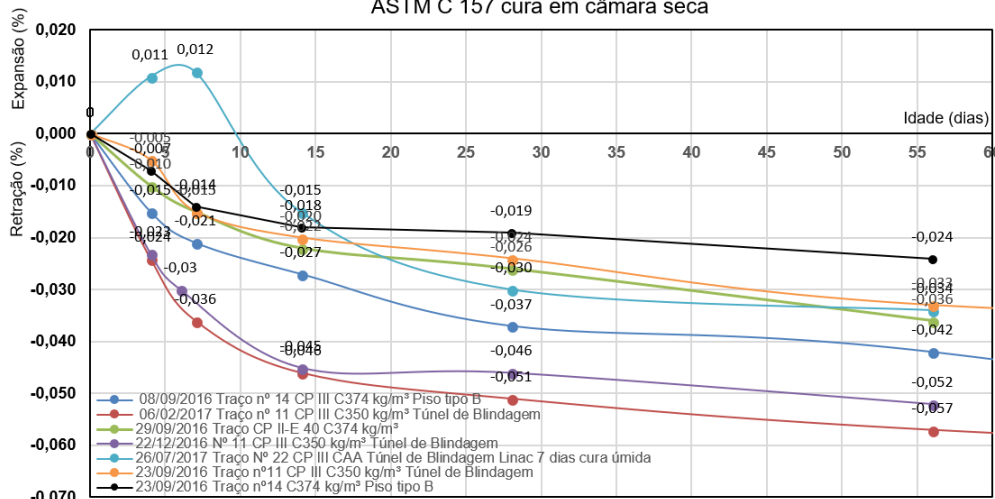
Detalhe da macrofibra polimérica

Figura 5: Verificação de traço em laboratório e série de ensaios.

- Resultados dos ensaios de retração por secagem, conforme gráfico abaixo:

Traços de concreto Projeto Sirius, resultados de ensaios de retração por secagem
ASTM C 157 cura em câmara seca

Figura 6 - Gráfico
resumo dos
ensaios de
retração dos
traços estudados.



5. ESTUDO TÉRMICO

Em função das dimensões das estruturas de concreto das paredes, piso e laje foi realizado estudo térmico para avaliar o desenvolvimento das temperaturas e respectivas tensões de origem térmica de forma a minimizar os riscos de fissuração na estrutura. A partir do estudo foi avaliada a melhor temperatura de lançamento do concreto fresco para minimizar a ocorrência de indesejáveis fissuras e que poderiam ser caminhos preferenciais para fuga de radiações, além de problemas na durabilidade do concreto causado pela eventual formação da etringita tardia (DEF) caso a temperatura no interior da estrutura de concreto fosse superior a 65°C.

O piso de concreto constitui a chamada laje tipo B e está diretamente apoiado sobre solo local recompactado e controlado e é composto por 20 segmentos trapezoidais similares, com dimensões aproximadas de 28,2m x 23,7m x 14,12m e altura de 0,90m. Entre estes segmentos foi deixado um vão com cerca de 2m de largura para a sua posterior complementação de modo a minimizar os efeitos de retração do concreto. O concreto foi especificado com f_{ck} de 30MPa aos 28 dias, módulo de deformação tangente inicial superior a 30GPa e relação água-cimento (a/c) inferior a 0,40. Inicialmente, como não haviam sido realizados estudos térmicos para a avaliação da temperatura de lançamento do concreto fresco, várias medidas foram preconizadas na documentação de projeto a respeito deste concreto, considerando a sua temperatura máxima no caminhão betoneira inferior a 20°C e imediatamente antes do seu lançamento e a temperatura máxima a ser atingida na estrutura de 55°C.

Para o cálculo de temperaturas e tensões adotou-se modelo tridimensional baseado no método dos elementos finitos (MEF) através do software b4cast versão 4.03 considerando as dosagens previamente estudadas e definidas em laboratório, geometria das estruturas e condições de lançamento do concreto. Vários fatores integram o modelo matemático como, por exemplo, a temperatura de lançamento e velocidade de lançamento do concreto fresco, condições ambientais (temperatura ambiente e velocidade do vento), características do cimento, dosagem do concreto utilizado, características térmicas e mecânicas do

concreto, base de apoio entre outros. A Figura 7 mostra a seção típica modelada do piso tipo B com espessura máxima de 0,90m.

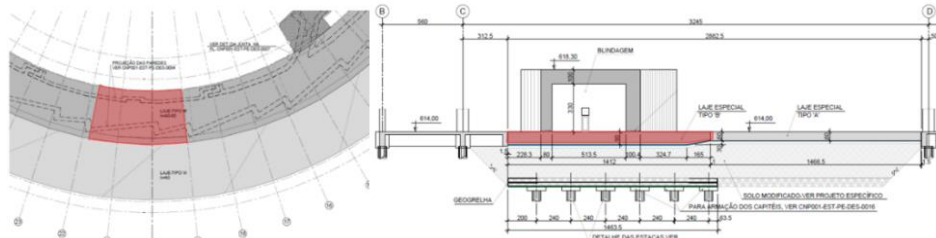


Figura 7 - Seção típica do piso tipo B, placas com espessura de 0,90cm (região na cor vermelha indicando a seção modelada) – (a) seção em planta e (b) corte A-A da seção (DESEK, 2016).

A Figura 8 apresenta a malha de elementos finitos adotada e as isotermas geradas pelo software utilizado para o cálculo

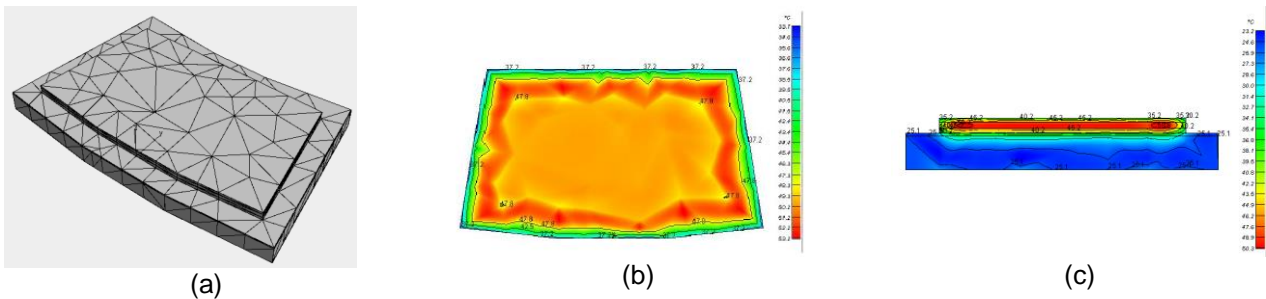


Figura 8 – Piso: laje tipo B (a) Malha de elementos finitos formada por elementos tetraédricos e gerada automaticamente pelo software; (b) isotermas na seção em planta e (c) isotermas na seção transversal após 30 horas do início do lançamento e na altura de 49,5cm a partir da base. (DESEK, 2016).

Para a análise do desenvolvimento das temperaturas e tensões do piso de concreto foram estudados 15 pontos nas diversas seções e altura do piso conforme mostra a Figura 9.

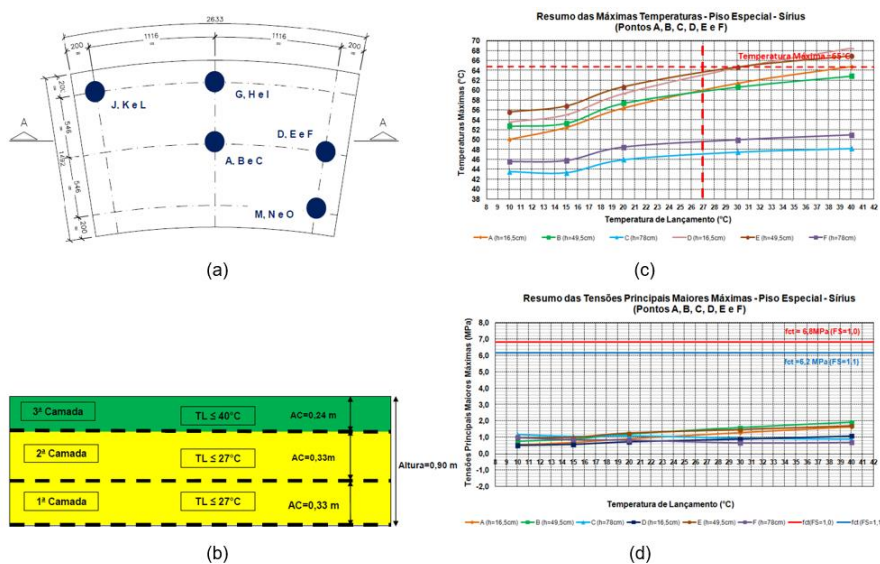


Figura 9 – Esquema geral da localização dos pontos de estudo; (b) resumo das máximas temperaturas para os pontos de A até F; (c) resumo das máximas tensões principais maiores máximas para os pontos de A até F (d) zoneamento das temperaturas de lançamento máxima do concreto fresco para o piso (DESEK, 2016). ANAIS DO 60º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2018 – 60CBC2018

De acordo com os resultados das simulações verificou-se que as tensões de origem térmica atuantes não são elevadas considerando o lançamento do piso em 03 camadas de concretagem com alturas de 0,33cm, 0,33cm e 0,24cm, respectivamente, a partir da fundação.

Como as tensões de tração resultantes do resfriamento do concreto não superaram a resistência à tração do concreto para o fator de segurança considerado de $FS=1,0$ e $FS=1,1$ [Figura 9 (d)], a probabilidade de fissuração por origem térmica foi considerada como mínima para as temperaturas de lançamento do concreto consideradas. As temperaturas máximas atingidas pelo concreto na estrutura para os casos estudados foram inferiores a 65°C para a temperatura máxima de lançamento do concreto de 27°C para as primeiras duas camadas de concretagem de altura de 0,33cm, cada. Na última camada com altura de 0,24m [Figura 9 (b) e (c)] as simulações mostraram que o concreto poderia ser lançado sem refrigeração, desde que a temperatura de lançamento fosse inferior a 35°C , sem haver o risco de formação de etringita tardia. Para aumentar o fator de segurança decidiu-se lançar os concretos a temperaturas inferiores a 20°C .

Também, foram realizados estudos térmicos para a estrutura do túnel de blindagem conforme mostra a Figura 10. Os resultados das simulações análogas aos estudos do piso evidenciaram riscos de fissuração térmica minimizados. Verificou-se que as tensões de origem térmica atuantes não seriam elevadas considerando o lançamento do túnel em duas etapas, a primeira até 2,4m de altura da parede e na segunda etapa o restante da parede e a laje. As temperaturas máximas atingidas pelo concreto na estrutura para os casos estudados deveriam ser inferiores a 65°C reduzindo o risco de formação de etringita tardia. Para que este limite de temperatura não fosse ultrapassado os concretos deveriam ser lançados com as temperaturas medidas nas formas iguais ou inferiores a 29°C nas duas etapas de concretagem.

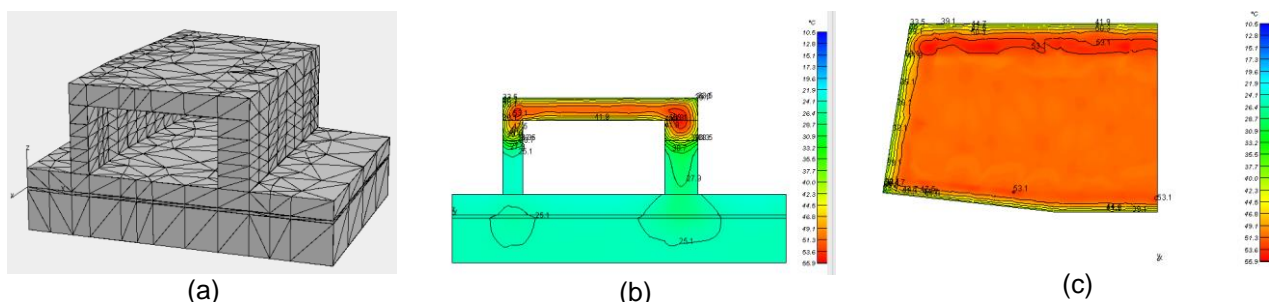


Figura 10 – Túnel de blindagem (a) Malha de elementos finitos formada por elementos tetraédricos e gerada automaticamente pelo software; (b) isotermas na seção em planta e (c) isotermas na seção transversal após 35 horas após o início do lançamento da segunda etapa de concretagem (DESEK,2017).

6. PROTÓTIPOS INSTRUMENTADOS – PRÉ OBRA

Frente a tais exigências especificadas para o projeto, foi proposto pelo comitê e aceito pelo cliente a execução de placas testes do piso especial, posteriormente evoluído para a execução de um protótipo em grande dimensão do piso especial de 90cm e do túnel de blindagem em escala real 1:1 para comparar com os resultados esperados e ter dados para realimentação dos parâmetros especificados para o concreto e deformações da estrutura para posterior validação pelo projeto, antes de iniciar as execuções das estruturas de concreto especial.

Traços de concreto, treinamentos das equipes de produção, forma, agente desmoldante, armadura de pele, sistemas de cura química e cuidados pós concretagem das paredes do túnel como o desaperto dos parafusos nas formas no dia seguinte foram testados e os resultados benéficos validou e qualificou produtos e procedimentos executivos.



Figura 11 - Protótipo do túnel de blindagem e piso especial Tipo B, placa de 90cm.

Para instrumentação do piso teste foram usadas unidades de *Datalogger*, para leitura de 41 sensores de deformação instalados, do tipo corda vibrante. Estes sensores são projetados para fixação direta, embutidos no concreto. O monitoramento das temperaturas foi realizado através de termos-resistência, baseados no princípio de variação da resistência ôhmica em função do aumento da temperatura. A [Figura 12 (d, e)] mostra os detalhes de instalação da instrumentação no protótipo do piso e parede do túnel de blindagem.



Figura 12 - (a, b) teste de forma com tela de aço expandida, (c) teste de armadura de pele, tela de vidro e tela metálica, (d) instrumentação da placa de piso Tipo B, (e) parede do túnel com extensômetros elétricos de corda vibrante e rosetas, (f) teste de agente desmoldante e aparência do concreto.

Os picos de temperatura no concreto da placa teste com 90cm de espessura se mantiveram abaixo de 65°C, confirmando as temperaturas e espessuras de camadas do estudo térmico e eliminando a possibilidade de formação de etringita tardia.

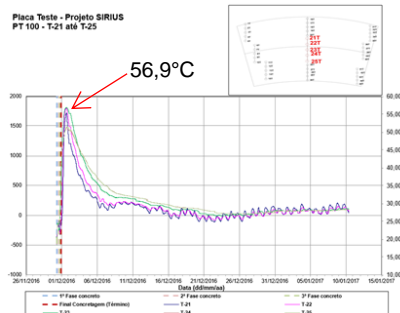


Figura 13 - Temperatura máxima no centro da placa – 56,9°C (BUREAU, 2016).

A Figura 14 mostra os detalhes de instalação da instrumentação no protótipo do piso.

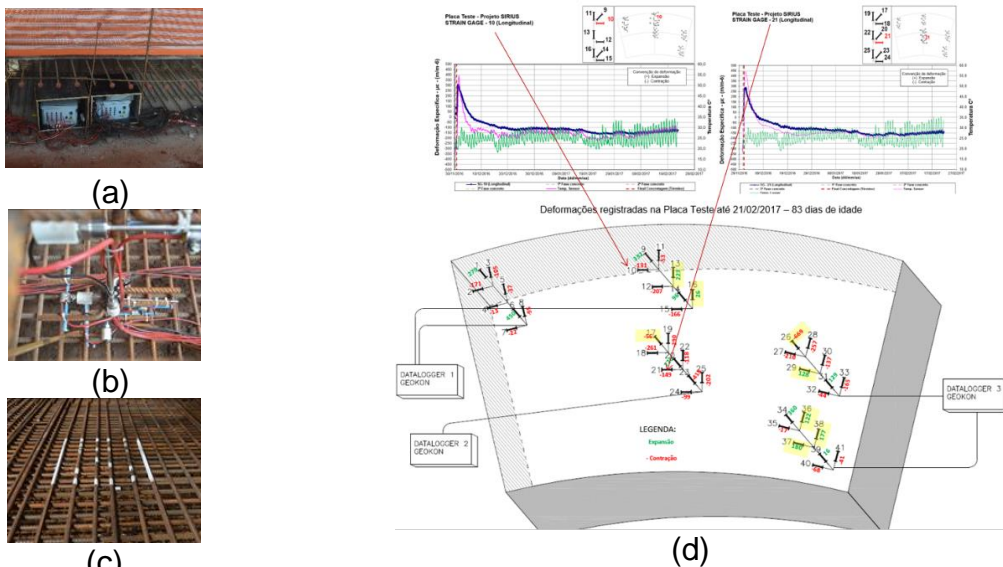


Figura 14 – Protótipos instrumentados (a) Detalhe das unidades de *Datalogger* utilizadas para armazenamento de dados e leituras dos sensores; (b) detalhe dos sensores de temperatura (tipo PT 100) e extensômetros instalados no protótipo (c) Detalhe de sinalização com tinta branca na armadura do protótipo nos locais de instalação da instrumentação, (d) Gráficos da instrumentação (BUREAU, 2016).

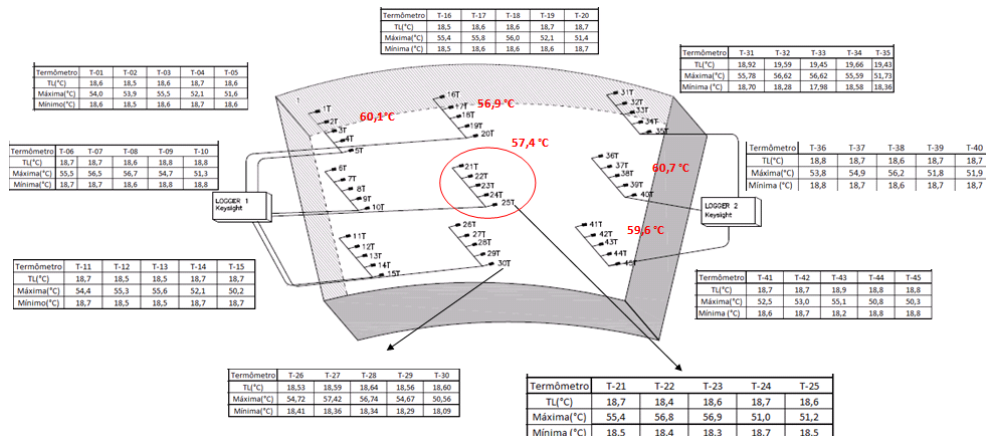


Figura 15 – Temperaturas de monitoramento dos sensores de temperatura sendo temperatura de lançamento do concreto fresco (TL) considerada como a primeira leitura realizada, temperaturas máximas e mínimas medidas (°C) para cada região monitorada; as temperaturas indicadas na cor vermelha indicam as temperaturas máximas calculadas em função da temperatura de lançamento do concreto (DESEK, 2016). ANAIS DO 60º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2018 – 60CBC2018

A Figura 16 mostra uma comparação entre as temperaturas medidas e calculadas considerando as leituras dos sensores de temperatura T-23 e T-25.

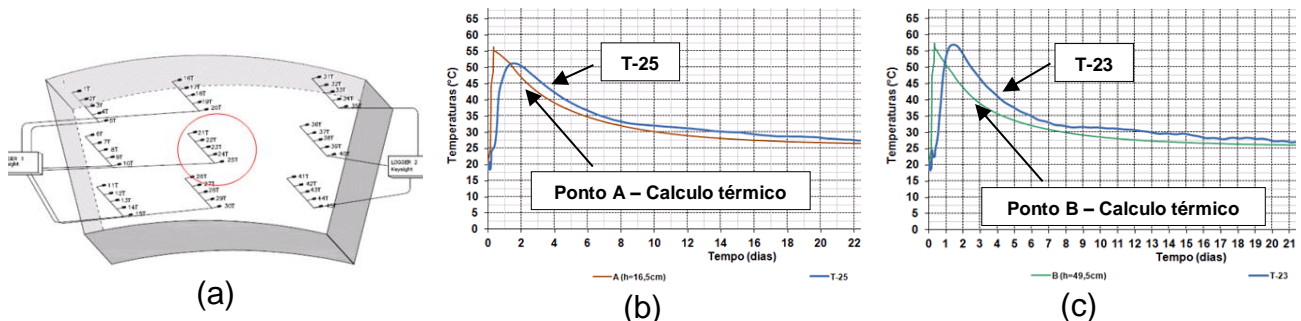


Figura 5 – (a) Seção analisada (b) desenvolvimento da temperatura no ponto A em relação aos dados de monitoramento do sensor T-25 (c) desenvolvimento da temperatura no ponto B em relação aos dados de monitoramento do sensor T-23 (DESEK,2016).

As temperaturas medidas in loco através da instalação de termômetros e as temperaturas calculadas pelo software aproximaram-se consideravelmente, o que mostra a eficiência deste tipo de simulação computacional tridimensional térmica para estruturas massivas. As diferenças verificadas com relação ao desenvolvimento da curva estão relacionadas ao calor específico, condutividade térmica e calor de hidratação considerados quando da modelagem matemática e que não coincidem exatamente com os valores reais do concreto empregado.

7. FORNECIMENTO DO CONCRETO



Figura 17 – Central de campo automatizada, com sensor de umidade, instalada no canteiro de obras. Agilidade no atendimento e acompanhamento das pesagens e ajustes na água de amassamento do traço em tempo real.

Rastreabilidade de todos os carregamentos de concreto registrados em protocolos com desvios de pesagens.

Frota de caminhões betoneiras e duas auto bomba lança sendo uma de reserva.

8. PLANOS DE CONCRETAGENS

Planos de concretagens elaborados a partir das especificações de projeto onde faixas de 2 metros, nomeadas na obra por “gavetas”, entre as placas dos pisos especiais, paredes e teto do túnel de blindagem foram concretadas após espera de 60 dias depois do término das concretagens das placas de pisos, trechos de paredes e da laje do túnel de blindagem. O período de espera inicialmente especificado para concretar as faixas era de 90 dias e após análise dos resultados de ensaios de retração dos traços estudados em laboratório, o projetista reduziu este tempo para 60 dias.

Curva de manutenção da trabalhabilidade do concreto fresco, produção de concreto e velocidade de lançamento foram as diretrizes consideradas para elaborar o plano de concretagem dos pisos especiais (Figura 18). O avanço alinhado e nivelado da frente de

concretagem evoluiu numa sequência planejada, sendo que cada betoneira deveria descarregar concreto na posição determinada para evitar afundamentos das máquinas acabadoras do piso. Este procedimento permitiu o controle da perda de consistência e endurecimento do concreto das camadas lançadas e reduziu ocorrências da secagem e enrijecimento prematuro de uma casca superficial, fenômeno conhecido por “crusting” ou borrachudo (Chodounky, 2008). As placas do piso de 90cm foram concretadas em 2 camadas de 35cm de espessura e 1 camada de 20cm de espessura, enquanto que as placas do piso de 60cm concretadas em uma camada de 40cm e 1 camada de 20cm.

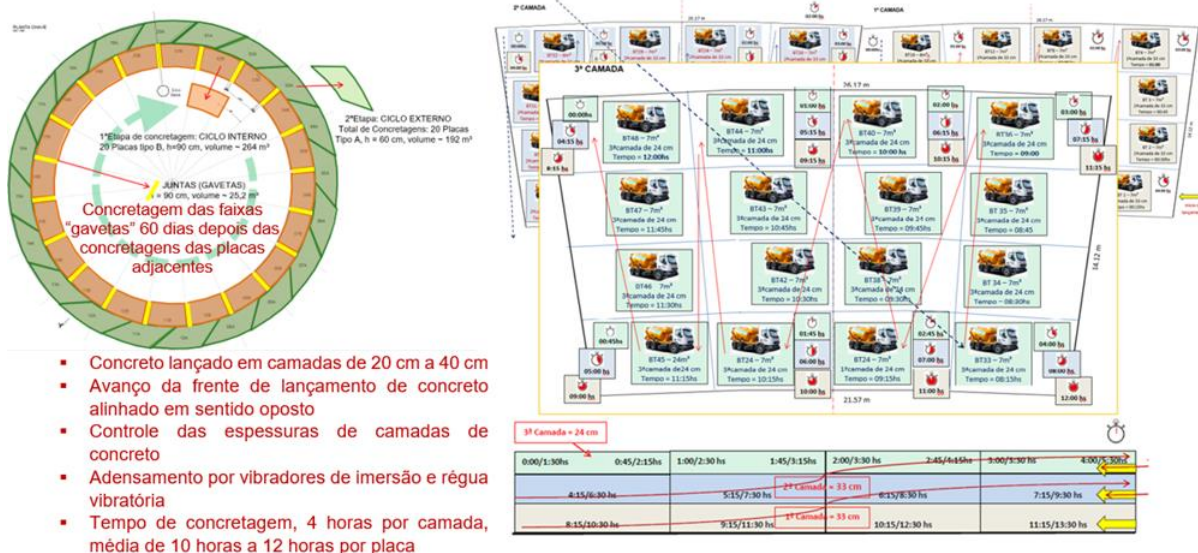


Figura 18 - Plano de concretagem dos pisos especiais

9. TREINAMENTOS

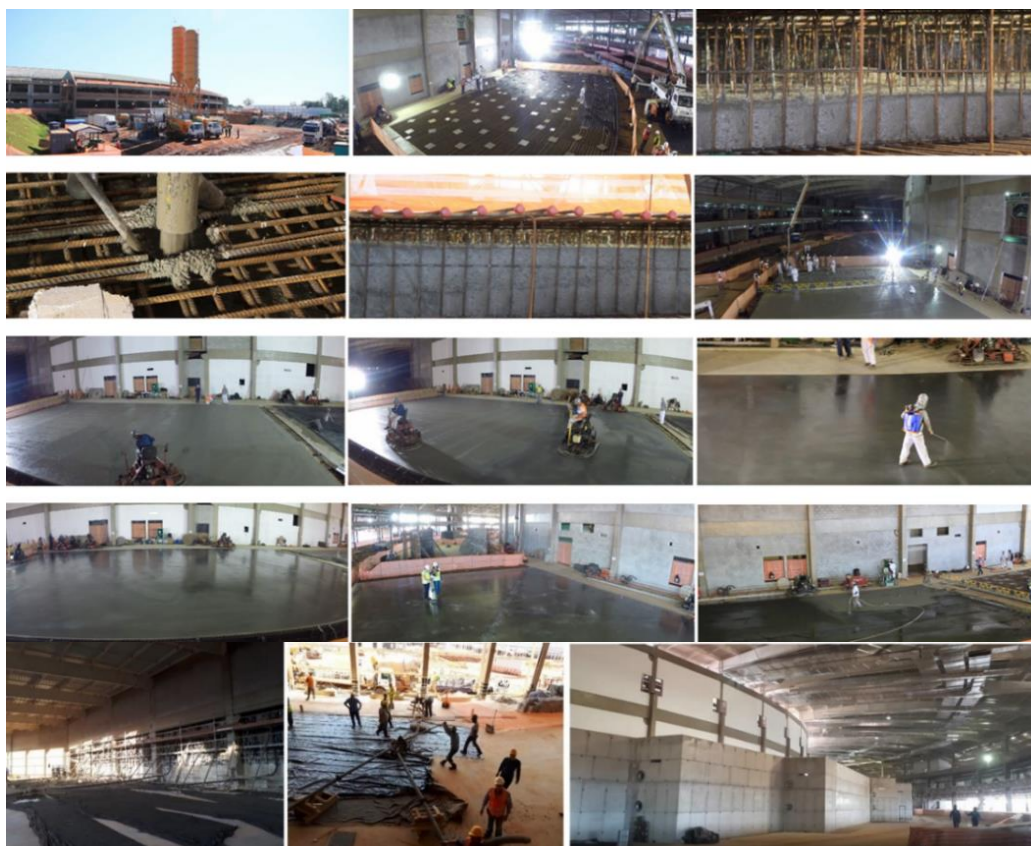
Treinamentos e capacitação para todas as equipes de produção com objetivos para atingir as exigências de planicidade e acabamento mecanizado para o piso especial e aparência do concreto das paredes do túnel de blindagem, desde as pesagens e dosagens do concreto nos caminhões betoneiras, liberações para lançamento executados em camadas conforme planos de concretagens, adensamento, acabamento mecanizado e cura química e úmida em pisos e nas paredes, cura química após retirada das formas depois de 7 dias.



Figura 19 - Treinamento para equipes de forma, armação, lançamento e vibração do concreto em camadas com espessura controlada e aplicação de retardador de superfície para executar corte verde nas juntas de concretagens entre as placas de piso e paredes do túnel (gavetas) e agente de cura química.

10. CONCRETAGENS

As concretagens foram satisfatórias em todos os requisitos.



Figuras 20 e 21

Concretagem da primeira placa do piso de 90cm

Concretagem simultânea de parede e laje do túnel com traço de concreto auto adensável no Linac, lançamento por 5 bombas e 10 linhas de tubulação com dispositivo de controle de fluxo tipo “guilhotina”.

Vista das paredes do túnel.

11. CONTROLE TECNOLÓGICO

O controle tecnológico foi dimensionado para atender plano de ensaios na central durante a produção de concreto, temperatura do concreto refrigerado, controle de umidade dos agregados e correção da água de amassamento e da quantidade de gelo. No recebimento e aceitação do concreto fresco, medida da temperatura do concreto refrigerado, medida do abatimento e por amostragem, medida do teor de ar incorporado e dos tempos de pega do concreto. No lançamento, durante a descarga do concreto, amostragem e moldagem de corpos de prova para ensaios de resistência e módulo de elasticidade do concreto.

12. PROCEDIMENTOS APÓS CONCRETAGEM

Cuidados simples, porém, importantes e adotados após o término das concretagens certamente minimizaram as ocorrências de fissuras de retração do concreto, entre estes cuidados, o desaperto das porcas e agulhas das formas no dia seguinte, após o endurecimento do concreto e a manutenção da forma nas paredes por 7 dias para evitar a perda de umidade do concreto e potencializar os efeitos benéficos da adição de compensador de retração a base de óxido de cálcio.

13. RESULTADOS

O controle tecnológico do concreto aplicado apresentou resultados satisfatórios atendendo as especificações de projeto, evidenciando aceitação automática da estrutura e dos pisos especiais.

A concretagem dos pisos especiais foi realizada de forma segmentada. Para cada segmento, as juntas de dilatação e as guias de referência para régua vibratória foram posicionadas com auxílio de técnicas de topografia, de forma a atingir os níveis de planicidade e nivelamento dos pisos especiais exigidos pelo projeto. Foi elaborado um plano especial de topografia que evitasse a propagação de erros de nível de segmento a segmento. O monumento central de topografia da obra foi utilizado como ponto de partida para a instalação e levantamento de uma poligonal de nivelamento contendo 20 pontos. Dessa forma, cada trecho de juntas e guias foi posicionada a partir de um ponto de referência diferente, mas que é conhecido no mesmo sistema de coordenadas dos demais. A poligonal foi levantada utilizando um nível ótico de precisão, modelo Wild NA2 com placa micrométrica. O erro de fechamento da poligonal ficou abaixo de 0,2 mm.

As juntas e guias foram posicionadas por empresa terceira e verificadas por outros dois times.

A Figura 22 apresenta uma vista de topo da região dos pisos especiais do Sirius, com informação da diferença de altura entre os pontos medidos e a referência do monumento central. A inspeção final foi realizada utilizando *Laser Tracker*.

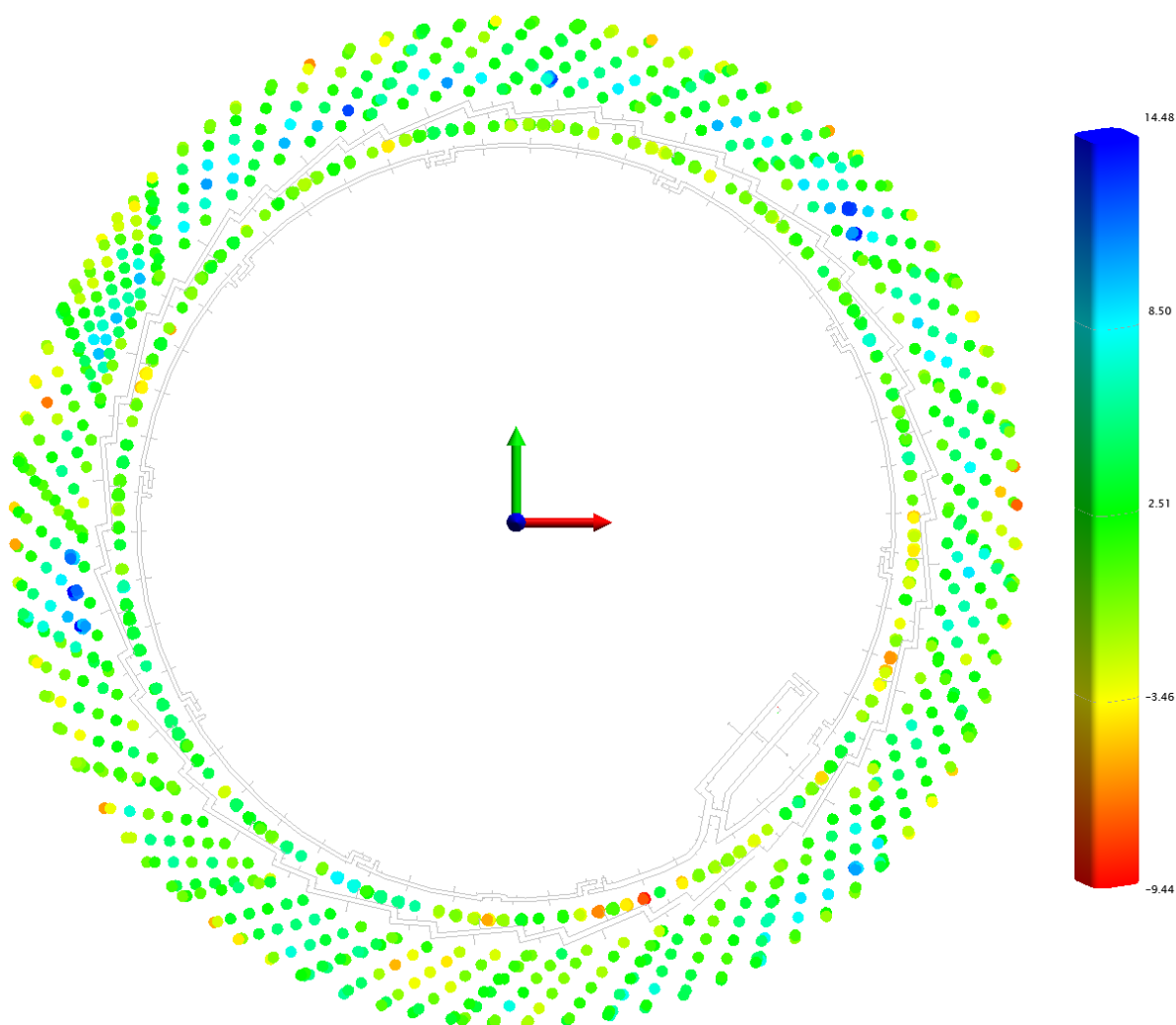


Figura 22 – Resultado de nivelamento e planicidade dos pisos especiais do Sirius
ANAIS DO 60º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2018 – 60CBC2018

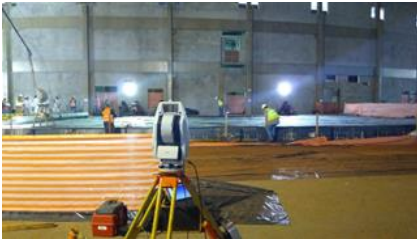


Figura 23 – Verificação final realizada com equipamento de metrologia por coordenadas portátil de alta precisão e exatidão, *Laser Tracker* modelo Leica AT401 (Erro Máximo Permissível de $\pm 15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m/m}$)

14. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Das diversas etapas, vencidas com muitas dificuldades em termos de fundações, camadas de estruturação de solo e sub-base, sobre as quais se apoiam os pisos do túnel e das áreas de testes, pode-se depreender:

- Os resultados obtidos no concreto, além de corresponder às expectativas especificadas em projeto, apresentam dados dignos de novas pesquisas tecnológicas;
- Exemplo disso são as características de muito baixa presença de fissuras, mesmo em peças de elevadas espessuras e formas geométricas desfavoráveis;
- As fissuras eventuais encontradas nas primeiras idades – sob intensa inspeção de todos os envolvidos, mostram-se ao longo do tempo quase imperceptíveis, como em estudos similares de auto cicatrização;
- Como a obra se desenvolveu com variações climáticas – pelo cronograma executivo e condições ambientais variáveis, houve necessidade de contínuo trabalho de ajustes e melhorias, por parte de toda a equipe;
- Os valores de variações volumétricas e movimentações das peças, sob intenso controle de termômetros e sensores, com registros contínuos ao longo de meses, mostraram-se superiores aos valores entendidos como necessários para esta obra, porém muito inferiores aos dados usuais utilizados para dimensionamento de obras de construção civil;
- O processamento de todas as determinações de temperaturas e deformações obtidas precisa de metodologia e tempo – de forma a obter-se informações para novos desafios.

15. REFERÊNCIAS

- ASPECTOS CONSTRUTIVOS E ESTABILIDADE. Disponível em <<http://www.lnls.cnpem.br/sirius/aspectos-construtivos-e-estabilidade>>. Acesso em 02 abril 2018.
- BINA, PAULO – Pisos industriais e pavimentos com fibras: O desenvolvimento e o futuro – Revista nº 56 2009 – Concreto e Construções – IBRACON
- BUREAU DE PROJETOS – Instrumentação da Placa Teste e Relatório de Leitura – Projeto Sirius – RIS-SP 103/17 Julho de 2017
- CHODOUNSKY, MARCEL A. Boletim Técnico 6 – ANAPRE. São Paulo, 2008.
- DESEK. Relatório Técnico – Projeto Sirius – Estudo térmico do concreto do piso especial tipo “B” TAK-PSI-RT-01-2016-R0B. São Paulo, 2016.
- DESEK. Relatório Técnico – Projeto Sirius – Estudo térmico do concreto do Túnel de Blindagem TAK-PSI-RT-01-2017-R0. São Paulo, 2017.
- IBRACON- Concreto: Ciência e Tecnologia, São Paulo, 2011
- ANAIS DO 60º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2018 – 60CBC2018