



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



@ 2018 - IBRACON - ISSN 2175-8182

## PROJETO SIRIUS – A TECNOLOGIA DE CONCRETO APLICADA NO SISTEMA DE BLINDAGEM DO ACELERADOR DE PARTÍCULAS DO PROJETO SIRIUS – PLANEJAMENTO E ESTUDO DE DOSAGEM.

Sirius Project - Concrete technology applied in the screening tunnel of the Sirius Project's particle accelerator - specifications, planning and mix design studies.

### Autores:

Roberto Dakuzaku – [rdakuzaku@stakashima.com.br](mailto:rdakuzaku@stakashima.com.br), Sócio IBRACON nº 25111808467, (2) Oscar Horácio Vigna Silva – [oscar.vigna@lnls.br](mailto:oscar.vigna@lnls.br), (3) Paulo Bina - [pbina@monobeton.com.br](mailto:pbina@monobeton.com.br), (4) Selmo Chapira Kuperman – [selmo@desek.com.br](mailto:selmo@desek.com.br), Sócio IBRACON nº 25101708225, (5) Eduardo Funashi Jr. – [eduardo.desek@gmail.com](mailto:eduardo.desek@gmail.com), (6) Júlio Rodrigues – [julio.rodrigues@racional.com](mailto: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 60 cm e 90 cm 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 present the concrete specifications and technology applied for construction of the floor and (screening) 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 dosages

to comply with project specifications, among them, 0,02% of shrinkage at the age of 28 days, good workability for the execution of special floors with thicknesses of 60 cm and 90 cm and comply with levels of flatness and leveling and control the concrete production and quality during the construction period. The installation of temperature and tension gauges 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 verification of concrete technology advanced concepts 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 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 1 nm.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 e espessuras variáveis de 0,8 metro à 1,5 metros.

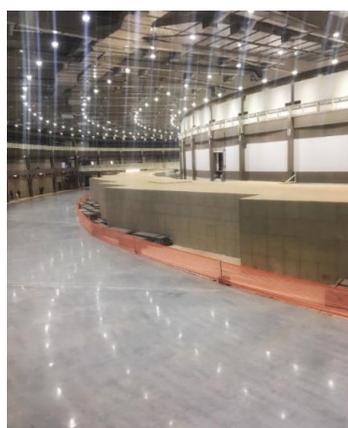


Figura 1: Edifício Sirius – Maio 2018, figura 2: Piso especial destinados às linhas de luz na área de ensaios e túnel de blindagem

## 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 3: 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 1,5 metros. 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 2 km 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 3,5 m de profundidade até o nível de instalação dos blocos de apoio do acelerador.

No desenho esquemático abaixo tem-se uma breve descrição dessa estruturação.

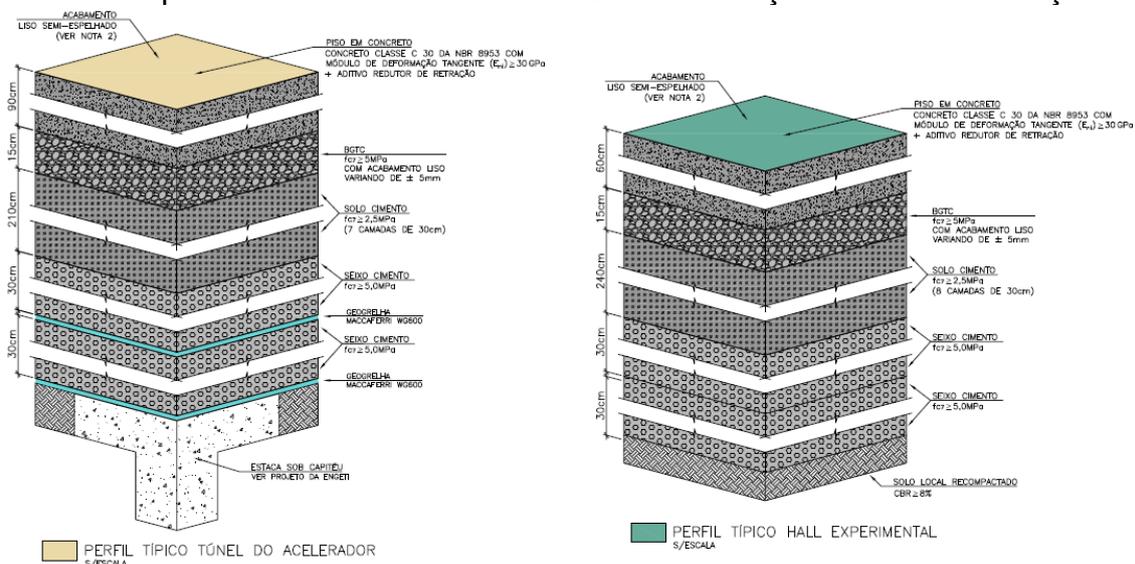


Figura 4: Estrutura dos pisos especiais

Os pisos sob o túnel do acelerador são de espessura 90 cm, 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 6.800 m<sup>3</sup> de concreto.

Já nas áreas de ensaios, os pisos são compostos de concreto armado com espessura de 60 cm, 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 60 cm foram utilizados cerca de 5.800 m<sup>3</sup> de concreto.

Para os túneis, com espessuras de até 1 m, foram utilizados cerca de 7.000 m<sup>3</sup> 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 420 m<sup>3</sup> 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 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**

As rigorosas exigências de projeto e das especificações técnicas para o concreto das estruturais especiais foram os dados de entrada, a seguir, usados para definir os estudos de dosagens e qualificação de fornecedores de ingredientes dos traços.

- Concreto classe de resistência C 30 – fck 30 MPa, módulo de deformação tangente inicial  $E_{ci} \geq 0,3fck \geq 30$  GPa, 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, diâmetro máximo do agregado graúdo 19 mm;
- Emprego de cimento de baixo calor de hidratação, tipo CP III ou CP IV, consumo mínimo 350 kg/m<sup>3</sup>;
- Traço de concreto com características, propriedades e adições de ingredientes para o concreto atender baixíssima retração e minimizar ocorrências de fissuras de retração por secagem;
- 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 etringita tardia (DEF) no futuro, patologia que já se manifestou em construções de algumas regiões do Brasil e pode causar deterioração de peças de concreto);
- Planicidade e nivelamento dos pisos especiais: FF global/mínimo – 65/50 e FL global/mínimo – 45/35
- Produção e fornecimento de concreto em central instalada no canteiro de obras, contendo 2 silos de cimento com capacidade mínima de 100 toneladas.

Sendo de conhecimento as exigências e especificações do projeto, **(teve) tiveram** início os estudos de dosagens dos traços de concreto especial em laboratório, para concretagens das placas de piso e do túnel de blindagem, com amostras de cimento e agregados da região da obra.

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.

Amostras de agregados miúdo, areia fina natural quartzosa, extraído de cavas e 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.

A escolha do aditivo tipo superplastificante a base de éter policarboxilato de terceira geração foi definida após série de ensaios de 5 produtos e fabricantes líderes de mercado e o produto escolhido foi o de melhor desempenho em trabalhabilidade do concreto fresco, refrigerado com gelo, reforçado com adição de macrofibra polimérica álcali resistente e compensador de retração a base de óxido de cálcio, Tipo G, adições e temperatura de lançamento até 20°C especificadas em projeto.

Nesta fase de estudos de traços, o aditivo superplastificante tipo SP II definido foi modificado e ajustado para o concreto gelado obter curva de manutenção e perda de trabalhabilidade por tempo adequado ao método executivo das concretagens das placas dos pisos especiais, desde a saída da central até o início das operações de acabamento.

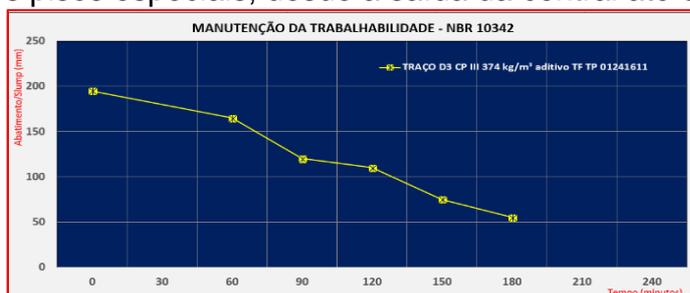


Figura 5: Curva de manutenção da trabalhabilidade do concreto refrigerado – traço D3

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

- Traço D1 - Túnel de Blindagem – concreto aparente

fck 30 MPa, Eci 0,4fck 30 GPa, abatimento S160/160 mm a 220 mm, brita 0 e 1, t 18°C±3°C

Cimento CP III 40 RS	Óxido de cálcio	Areia fina Quartzo	Areia Artificial Calcário	Pedra 0 Basalto	Pedra 1 Basalto	Macrofibra polimérica	Água/Gelo	Aditivo SP II
350 kg/m³	15 kg/m³	588 kg/m³	277 kg/m³	396 kg/m³	735 kg/m³	4 kg/m³	50/100 kg/m³	3,800 kg/m³
1,000	Adição	1,468	0,691	1,038	1,927	Adição	0,401	0,008

- Traço D2 CAA - Túnel de Blindagem LINAC – concreto aparente

fck 30 MPa, Eci 0,4fck 30 GPa, espalhamento SF2/660 mm a 750 mm, brita 0 e 1, t 18°C±3°C

Cimento CP III 40 RS	Óxido de cálcio	Areia fina Quartzo	Areia Artificial Calcário	Pedra 0 Basalto	Pedra 1 Basalto	Fibra de vidro AR	Água/Gelo	Aditivo 1 SP II
374 kg/m <sup>3</sup>	15 kg/m <sup>3</sup>	621 kg/m <sup>3</sup>	292 kg/m <sup>3</sup>	352 kg/m <sup>3</sup>	654 kg/m <sup>3</sup>	4 kg/m <sup>3</sup>	78/90 kg/m <sup>3</sup>	4,5 kg/m <sup>3</sup>
1,000	Adição	1,468	0,691	1,038	1,927	Adição	0,401	0,008
Aditivo 2 Estabilizador de hidratação tipo AEH								0,600 l/m <sup>3</sup>

- Traço D3 - Piso especial Tipo A e Tipo B, acabamento mecanizado, com controle de nivelamento e planicidade e áreas em concreto aparente

fck 30 MPa, Eci 0,4fck 30 GPa, abatimento S160/160 mm a 220 mm, brita 0 e 1, t 18°C±3°C

Cimento CP III 40 RS	Óxido de cálcio	Areia fina Quartzo	Areia Artificial Calcário	Pedra 0 Basalto	Pedra 1 Basalto	Macrofibra polimérica	Água/Gelo	Aditivo SP II
374 kg/m <sup>3</sup>	12 kg/m <sup>3</sup>	567 kg/m <sup>3</sup>	267 kg/m <sup>3</sup>	401 kg/m <sup>3</sup>	744 kg/m <sup>3</sup>	4 kg/m <sup>3</sup>	70/90 kg/m <sup>3</sup>	3,180 kg/m <sup>3</sup>
1,000	Adição	1,468	0,691	1,038	1,927	Adição	0,401	0,008

Resultados dos ensaios dos estudos de traços em laboratório:

- Ensaios no concreto fresco:

Traço	Aplicação	Abatimento NBR NM 67 (mm)	Espalhamento NBR15823-2 (mm)	Ar incorporado NBR NM 47 (%)	Massa unitária (kg/m <sup>3</sup> )	t <sub>500</sub> 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)
D2	Túnel	175	-	2,7	2500	-	-	-	-	-
D22 CAA	Túnel Linac	-	695	1,7	2479	2,52	15	0,89	9,6	11
D3	Piso	160	-	2,2	2534	-	-	-	-	-

- 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
D2	Túnel	15	38,1	52,7	72,3	3,7	5,6	6,8	-	-	-	33,6	E6 = 42,2	-
D22 CAA	Túnel Linac	0,6	R5 = 37,1	45,9	74,1	-	-	-	-	-	-	-	35,7	43,3
D3	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

- Ensaios de retração por secagem, resultados obtidos conforme gráfico abaixo:

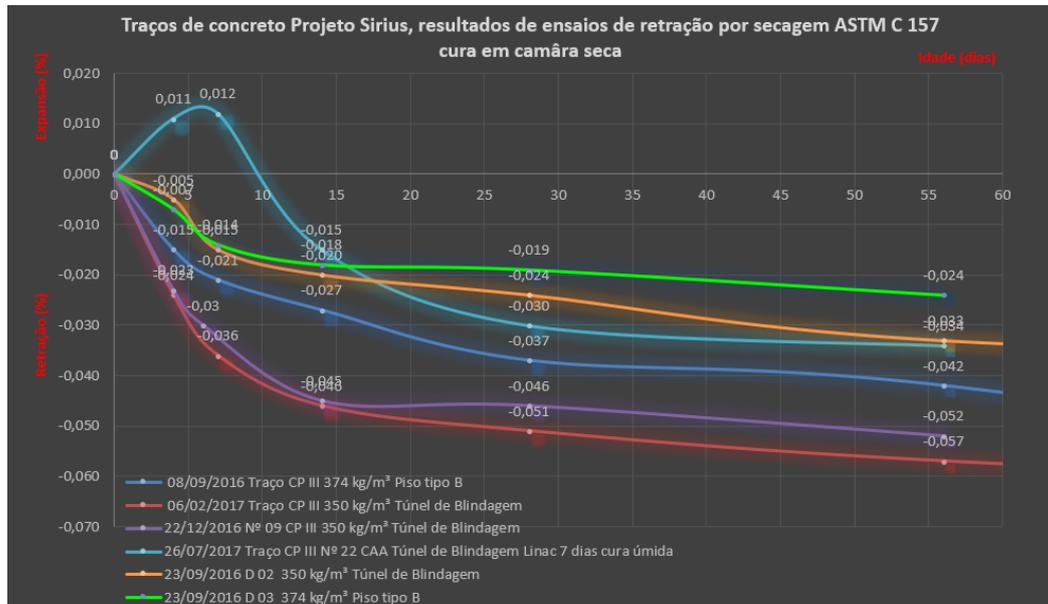


Figura 7: Gráfico resumo dos ensaios de retração dos traços estudados



Figura 8: Verificação dos traços em laboratório

## 5. ESTUDO TÉRMICO E DIMENSIONAL (RETRAÇÃO)

Em função das espessuras das paredes, piso e laje, realizou-se estudos de evolução tridimensional de temperaturas e tensões foi utilizando o programa B4cast versão 4.03, baseado no método dos elementos finitos. Vários fatores integram o modelo matemático como, por exemplo, a temperatura de lançamento do concreto, velocidade de lançamento do concreto, condições ambientais (temperatura ambiente e velocidade do vento), características do cimento, dosagem do concreto utilizado, características térmicas e mecânicas do concreto, geometria da estrutura, base de apoio entre outros.

O objetivo do estudo foi adquirir dados para minimizar a ocorrência de fissuras como pontos de fuga de radiações, e futuros problemas na durabilidade do concreto causado pela eventual formação da etringita tardia (DEF).

O piso em questão, de concreto constitui a chamada laje tipo B, estará diretamente apoiado sobre solo local recompactado e controlado e será composto por 20 segmentos trapezoidais similares, com dimensões aproximadas de 28,2 m x 23,7 m x 14,12 e altura de 0,9 m. Entre estes segmentos será deixado um espaço com cerca de 2m de largura para uma posterior

concretagem de fechamento dos vãos. O concreto para estes blocos foi especificado com  $f_{ck}$  de 30MPa aos 28 dias, módulo de deformação tangente inicial superior a 30GPa e relação água-cimento inferior a 0,40. Como não haviam sido realizados estudos térmicos para a avaliação da melhor temperatura de lançamento do concreto, inicialmente, várias medidas foram preconizadas na documentação a respeito deste concreto, estando entre elas a de que a temperatura do concreto no caminhão-betoneira não deveria ultrapassar 20°C imediatamente antes do lançamento nem a temperatura máxima a ser atingida não deveria ser superior a 55°C.

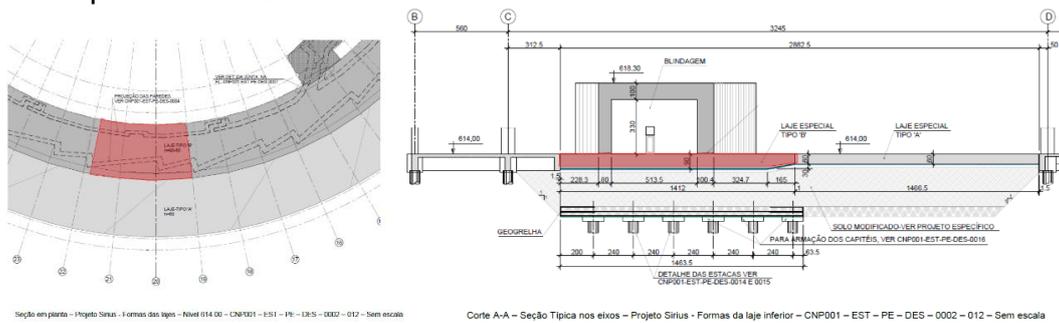
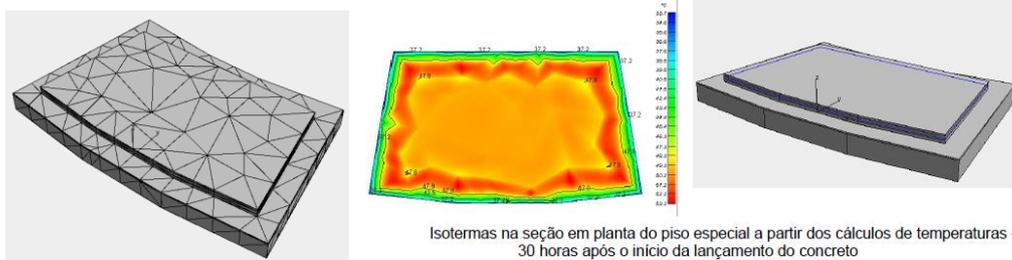


Figura 9: Seção típica do piso tipo B, placas com espessura de 90 cm



Isotermas na seção em planta do piso especial a partir dos cálculos de temperaturas – 30 horas após o início da lançamento do concreto

Figura 10: Malha de elementos finitos e isotermas

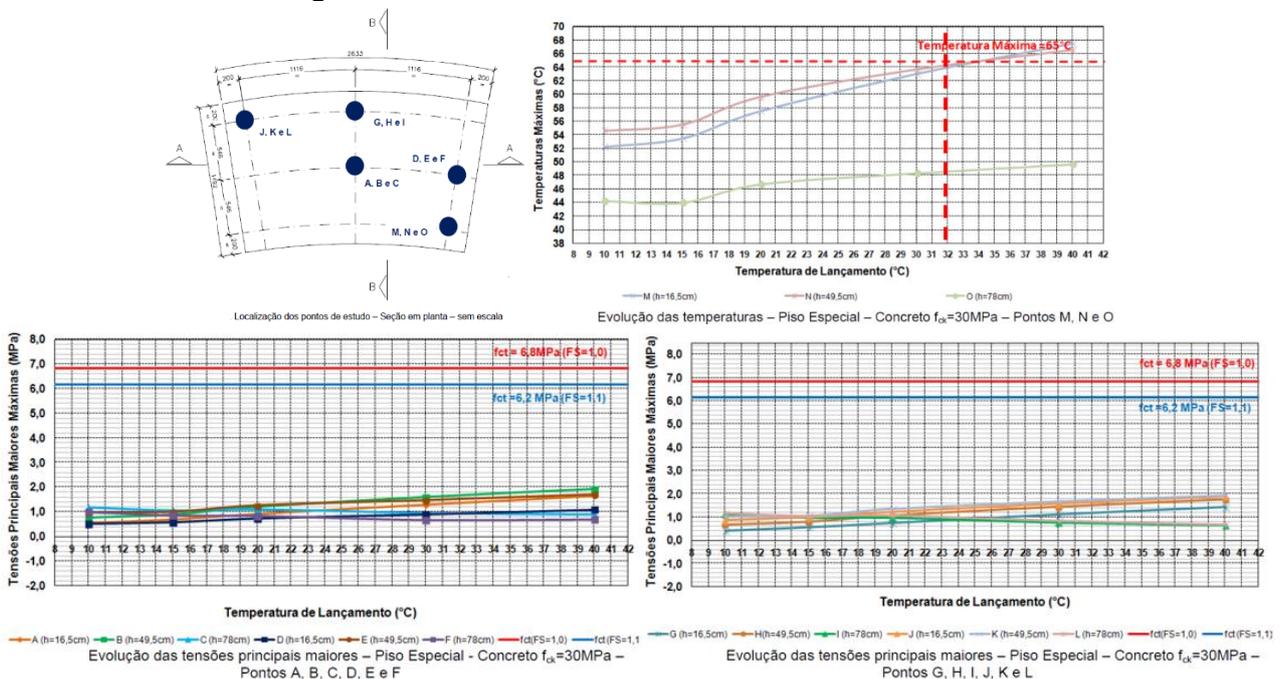


Figura 11: Evolução das tensões principais e temperaturas de lançamento

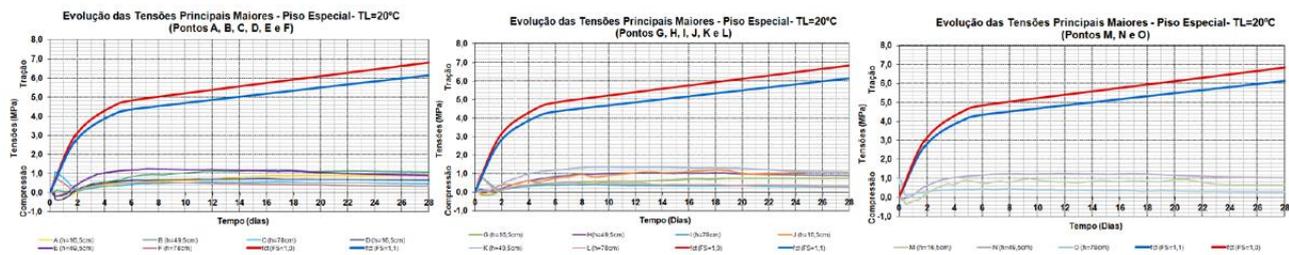


Figura 12: Evolução das tensões principais do concreto lançado a temperatura de 20°C

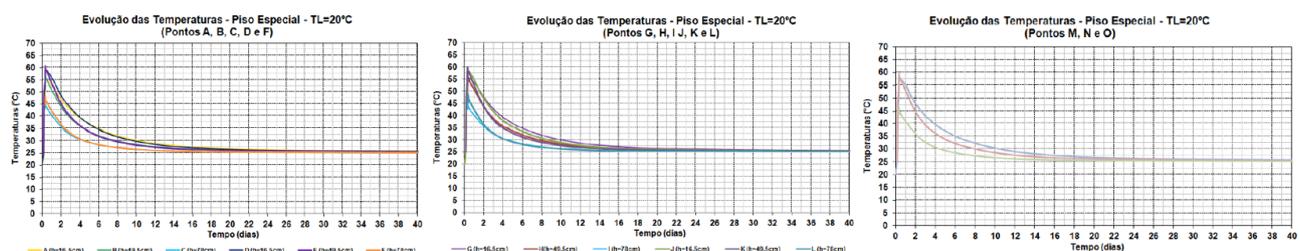


Figura 13: Evolução das temperaturas do concreto lançado a 20°C

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

Como as tensões de tração oriundas do resfriamento do concreto não superaram a resistência à tração do concreto para o FS=1,0 e FS=1,1, a probabilidade de fissuração por origem térmica é mínima para as temperaturas de lançamento do concreto consideradas neste estudo. As temperaturas máximas atingidas pelo concreto na estrutura para os casos estudados foram inferiores a 65°C reduzindo o risco de formação de etringita tardia. Para que este limite de temperatura não fosse ultrapassado, os concretos foram lançados em camadas e com as temperaturas medidas nas formas inferiores a:

- 1ª Camada: h= 0,33 m e TL ≤ 27°C
- 2ª Camada: h= 0,33m e TL ≤ 27°C
- 3ª Camada: h= 0,24m e TL ≤ 40°C (sem refrigeração)

Também, foram realizados estudos térmicos para a estrutura do túnel de blindagem e os resultados das simulações análogas aos estudos do piso evidenciaram riscos de fissuração térmica minimizados, conforme resultados obtidos, verificou-se que as tensões de origem térmica atuantes não serão elevadas considerando o lançamento do túnel em duas etapas de lançamento, a primeira até 2,4 m de parede e na segunda etapa o restante da parede e a laje.

## 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 90 cm 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 14: Protótipo do túnel de blindagem e piso especial Tipo B, placa de 90 cm



Figura 15: (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, (g) teste de agente desmoldante e aparência do concreto.

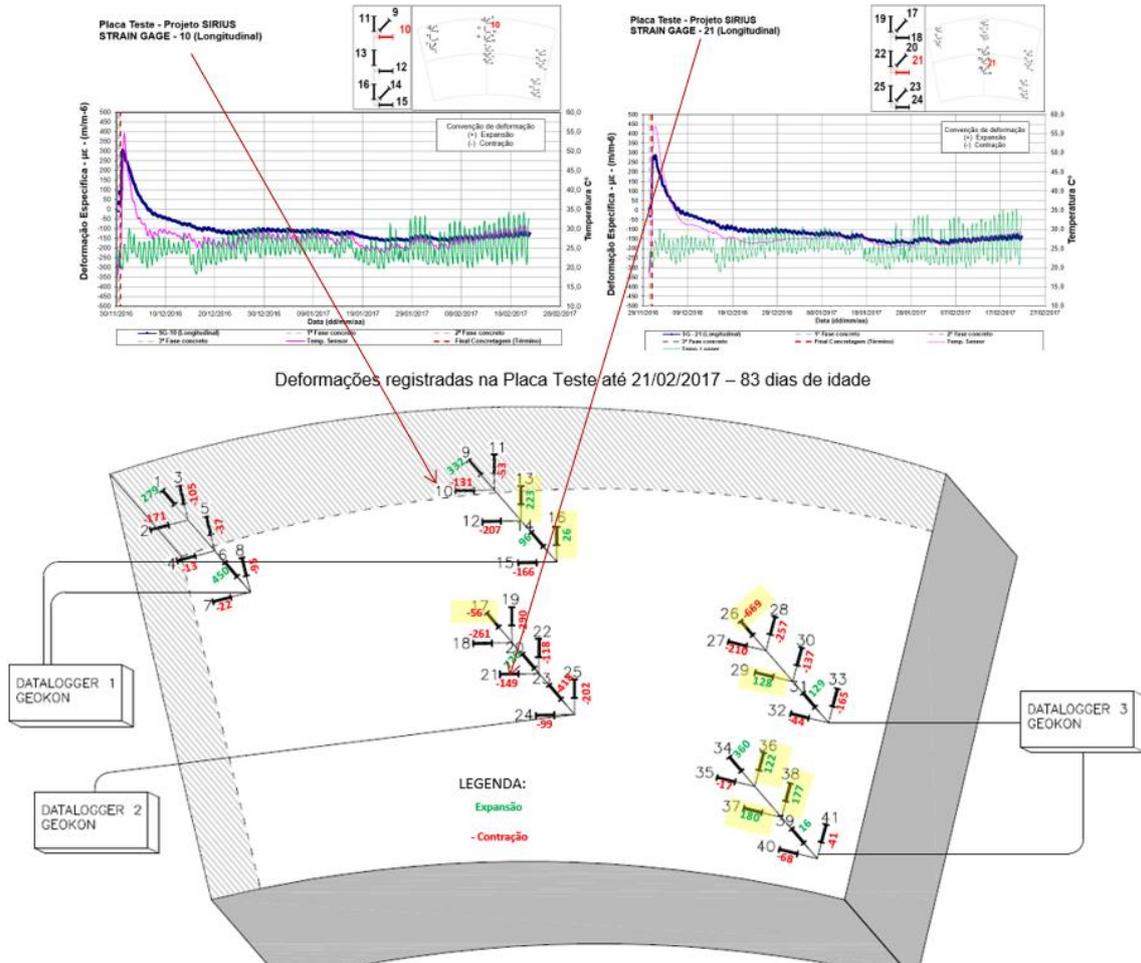


Figura 16: Gráficos com resultados da instrumentação da placa teste

Placa Teste - Projeto SIRIUS  
PT 100 - T-21 até T-25

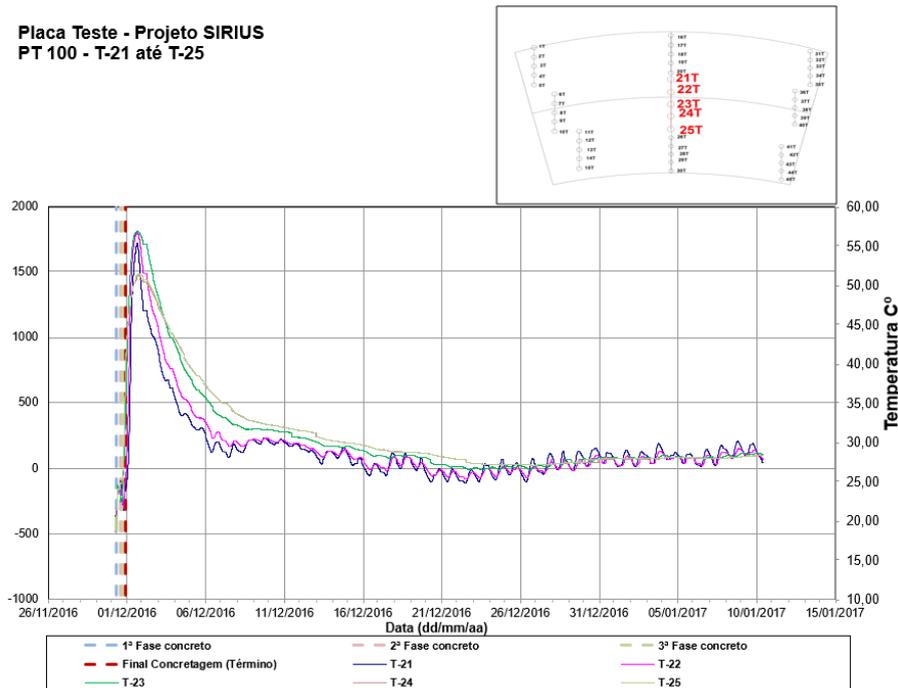


Figura 17: Temperatura máxima no centro da placa teste inferior a 60°C

O pico de temperatura no concreto da placa teste com 90 cm de espessura se mantiveram abaixo de 58°C, confirmando as temperaturas e espessuras de camadas do estudo térmico e eliminando a possibilidade de formação de etringita tardia.

## 7. FORNECIMENTO DO CONCRETO



Figura 18: 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.

## 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 e nas paredes e teto do túnel de blindagem foram concretadas após esperar 60 dias depois do término das concretagens das placas de pisos e trechos de paredes e 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.

Os pisos de 90 cm foram concretados em 2 camadas de 35 cm de espessura e 1 camada de 20 cm de espessura, os pisos de 60 cm em uma camada de 40 cm e 1 camada de 20 cm. Ainda, no plano de concretagem das placas dos pisos especiais, no dimensionamento da velocidade de concretagem para a produção foi estabelecido a sequencias de descarga de cada caminhão betoneira e o avanço alinhado e nivelado da cabeça de concretagem para facilitar o controle dos tempos de pega das camadas de concreto lançado e eliminar as ocorrências dos borrachudos e dificultar as operações de acabamento mecanizado do piso, conforme figura a seguir:

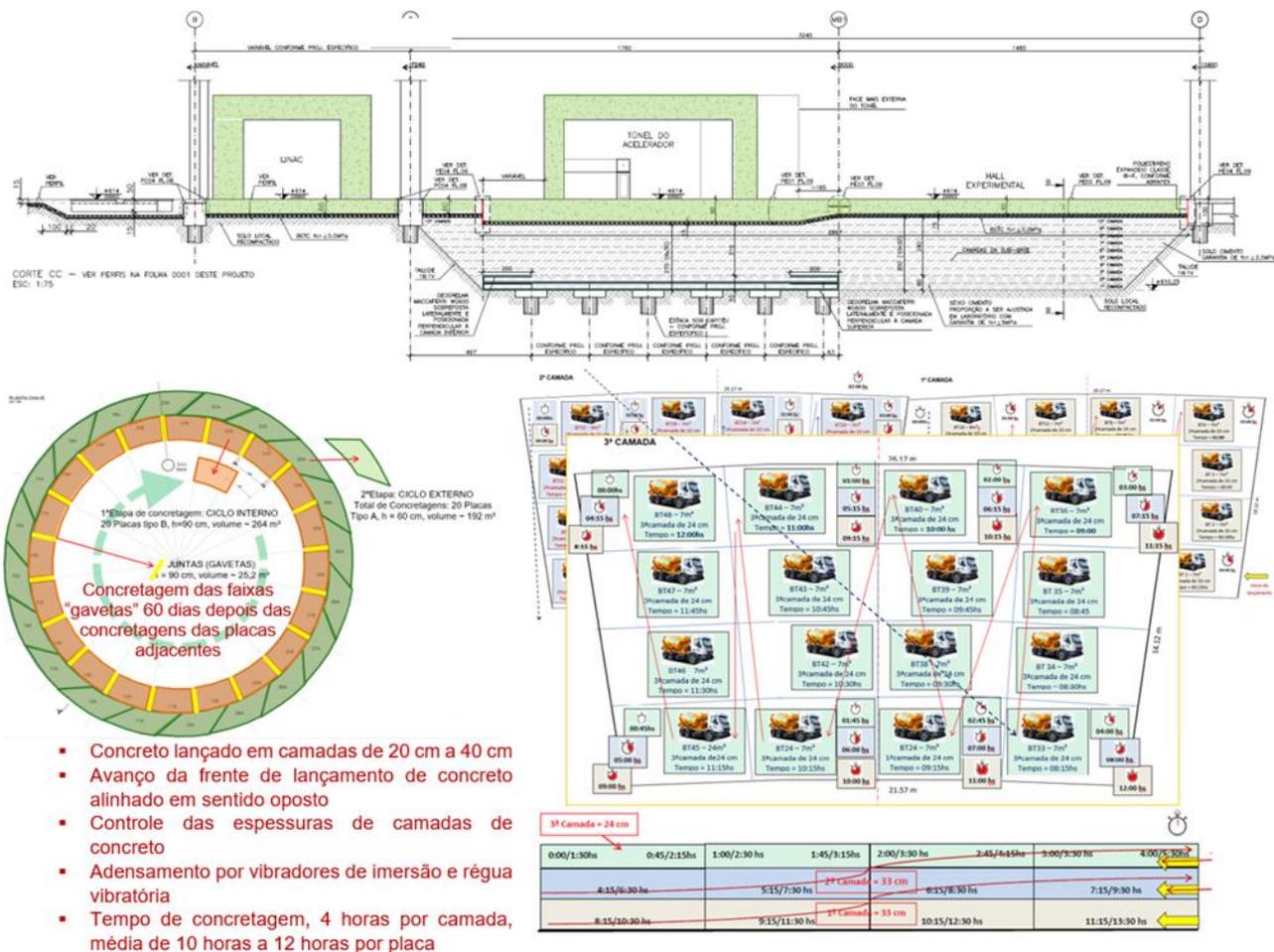


Figura 19: Plano de concretagem dos pisos especiais

## 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 20: Treinamento para equipes de forma e armação, lançamento de concreto em camadas com espessura controlada, para vibradoristas 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 a base de resina polimérica

## 10. CONCRETAGENS

As concretagens foram satisfatórias em todos os aspectos, desde a programação, fornecimento, lançamento e atendimento das especificações de projeto.

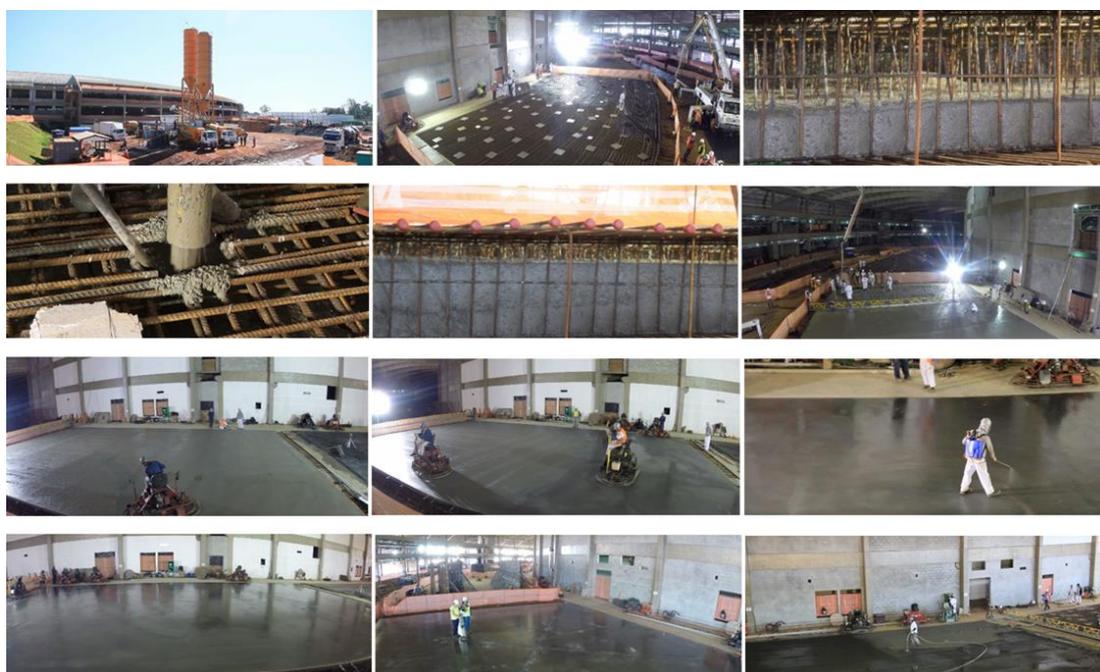


Figura 21: Concretagem da primeira placa do piso de 90 cm



Figura 22: 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 e concreto aparente do túnel de blindagem

## 11. CONTROLE TECNOLÓGICO

Conforme plano de ensaios dimensionado para atendimento do projeto:

- Na central, durante a produção do concreto
  - Determinação manual pelo método da frigideira da umidade dos agregados a cada 2 horas de produção contínua para aferição da correção de água pesada em cada pesagem pelo sensor de umidade da automação da central e ajuste da água de amassamento do traço e do gelo;
  - Controle de temperatura do concreto refrigerado com gelo;
  - Acompanhamento das pesagens, dosagem e mistura do concreto, das adições e liberação dos carregamentos por técnico sênior especializado em tecnologia de concreto.
  
- No concreto fresco e endurecido
  - Determinação do abatimento inicial conforme NBR NM 67 e da temperatura
  - Determinação do espalhamento do concreto auto adensável – NBR 15923-2
  - Amostragem total, em todo concreto aplicado nas estruturas especiais, moldagem de corpos de prova e ensaios de resistência mecânica – NBR NM 33, NBR 5738, NBR 5739 e NBR 12142.
  - Determinação do tempo de início e fim de pega em uma remessa escolhida no final da concretagem, conforme NBR NM 09
  - Ensaio de módulo de deformação tangente inicial  $E_{ci0,3fck}$ , nas idades de 7 e 28 dias conforme NBR 8522.

## 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 e após o endurecimento do concreto e a manutenção da forma nas paredes por 7 dias para evitar a perda de umidade pelo concreto com adição de compensador de retração a base de óxido de cálcio nas primeiras idades foram importantes para não ocorrer fissuras de retração por secagem do concreto aparente das paredes e laje do túnel de blindagem,

### 13. RESULTADOS

Placas de piso, parede e laje de cobertura do túnel de blindagem sem fissuras atendendo um dos principais requisitos dos usuários em ter um túnel estanque em termos de vazamento de radiações e sem patologias.

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

### 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:

- a) Os resultados obtidos no concreto, além de corresponder às expectativas especificadas em projeto, apresentam dados dignos de novas pesquisas tecnológicas;
- b) 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;
- c) 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;
- d) Os valores de variações volumétricas e movimentações das peças, sob intenso controle de termômetros e tensores, 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;
- e) 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

- <http://www.lnls.cnpem.br/sirius/aspectos-construtivos-e-estabilidade/>
- Relatório Técnico – Projeto Sirius – Estudo térmico do concreto do piso especial tipo “B” TAK-PSI-RT-01-2016-R0B – DESEK LTDA
- Relatório Técnico – Projeto Sirius – Estudo térmico do concreto do Túnel de Blindagem TAK-PSI-RT-01-2017-R0 – DESEK LTDA
- Relatório de ensaio N° 109.356 – Verificação de dosagem – ABCP
- Relatório de ensaio N° 113.922 – Verificação de dosagem – ABCP