

Desafios da produção das bases pré-fabricadas em concreto de elevado módulo de elasticidade do acelerador Sirius – CNPEM

DENER ALTHEMAN – DR. | CONS. TÉCNICO – <https://orcid.org/0000-0002-5232-8505> (sobeia@outlook.com.br);

ADRIANA A. A. DE SOUZA – DRA. | CONS. TÉCNICO – <https://orcid.org/0000-0002-6486-2828> | **SOBEA TECNOLOGIA & CONSULTORIA**

FELIPE C. DE CAMARGO – ENG. | GER. INDUSTRIAL – (felipe.camargo@leonardi.com.br);

MARCELO C. MARIN – ENG. MESTRE | DIR. DE ENGENHARIA – <https://orcid.org/0000-0001-5727-1571> | **LEONARDI CONSTRUÇÃO INDUSTRIALIZADA**

RESUMO

O LABORATÓRIO NACIONAL DE LUZ SÍNCROTRON – SIRIUS É A MAIS COMPLEXA INFRA-ESTRUTURA CIENTÍFICA JÁ CONSTRUÍDA NO PAÍS, PROJETADA PARA GERAR LUZ SÍNCROTRON, SENDO A MAIS BRILHANTE NA SUA FAIXA DE ENERGIA. A ESTABILIDADE NA VELOCIDADE E A TRAJETÓRIA DOS ELÉTRONS É GARANTIDA POR ELETROÍMÃS DE DIFERENTES FUNÇÕES E CARACTERÍSTICAS, INSTALADOS EM BASES, QUE SÃO ELEMENTOS RÍGIDOS ADERIDOS AO PISO DO LABORATÓRIO. ALÉM DE SUPORTAR A REDE, AS BASES CONTRIBUEM PARA EVITAR A PROPAGAÇÃO DE RESSONÂNCIAS MECÂNICAS ENTRE AS ESTRUTURAS DO ANEL E O PISO ESPECIAL. OS REQUISITOS INICIAIS DA EQUIPE DE PROJETO DO CNPEM (CENTRO NACIONAL DE PESQUISA EM ENERGIA E MATERIAIS) DETERMINAVAM BASES EM CONCRETO PRÉ-FABRICADO PARA ATENDER AO MÓDULO DE ELASTICIDADE DA ORDEM DE 60 GPa E VARIAÇÃO DIMENSIONAL

MICROMÉTRICA MÁXIMA DE 2 MM (0,2%) EM TODAS AS DIMENSÕES: PLANICIDADE, PARALELISMO E PERPENDICULARIDADE, ENTRE AS FACES. ESTE ARTIGO APRESENTA OS DESAFIOS SUPERADOS PARA QUE TODOS OS REQUISITOS FOSSEM ATENDIDOS COM A QUALIDADE E A PRECISÃO REQUERIDAS.

PALAVRAS-CHAVE: CONCRETO PRÉ-FABRICADO, PRECISÃO DIMENSIONAL, CONTROLE E PRODUÇÃO.

1. INTRODUÇÃO

O Projeto do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron - Sirius é uma complexa infraestrutura científica capaz de gerar Luz Síncrotron. Esta luz é alcançada a partir da aceleração de um feixe de partículas (elétrons) em velocidades próximas a

da luz. Por meio de uma estrutura laboratorial, é possível converter estas partículas aceleradas em um tipo de radiação de amplo espectro (Infravermelho, Ultravioleta e Raio X) (CNPEM, 2014).

No Brasil, o primeiro acelerador Síncrotron foi instalado em 1997 nas dependências do Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM) em Campinas, possui alta confiabilidade e estabilidade (BRUM & MENEGHENI, 2002). Contudo, o número de estações de pesquisa atingiu seu limite e suas máquinas e equipamentos não permitem mais a realização de experimentos avançados. Por isso, foi



FIGURA 1

LABORATÓRIO NACIONAL DE LUZ SÍNCROTRON – INAUGURAÇÃO DO LNLS – SIRIUS

FONTE: CNPEM (2018)

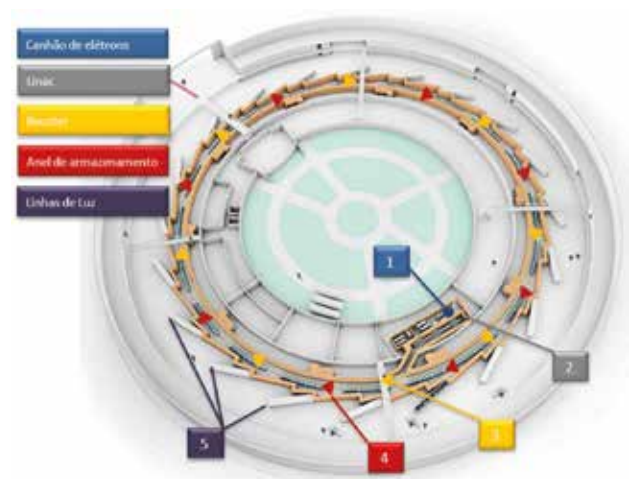


FIGURA 2

ESQUEMA DE COMPOSIÇÃO DA GERAÇÃO DE LUZ SÍNCROTRON – PROJETO SIRIUS

FONTE: CNPEM (2014)

construído o LNLS — Sirius (Figura 1), que é uma complexa e moderna instalação, um dos quatro maiores do mundo, sendo a fonte de luz síncrotron brasileira de 4ª geração (GERAISSATE *et al.*, 2021).

O Sirius gera luz a partir da seguinte composição dos equipamentos que compõem a estrutura básica necessária para gerar a luz: Canhão de elétrons, *Linac*, *Booster*, Anel de armazenamento e Linhas de luz (Figura 2).

O Canhão de elétrons é o equipamento que inicia o processo, emitindo um feixe de elétrons que serão acelerados. O feixe é enviado para o *Linac*, um conjunto de instrumentos eletromagnéticos que aceleram os elétrons até uma velocidade próxima à da luz. Quando são aceleradas, as partículas passam ao *Booster*, uma estrutura circular com 165 m de diâmetro e 518 m de circunferência, responsável por aumentar a energia dos elétrons acelerados pelo *Linac* (CNPEM, 2014). Estes instrumentos estão localizados em posições tangentes à circunferência, e quando acionados, desviam a trajetória dos elétrons. A energia incorporada ao feixe de elétrons recém-desviado produz um tipo de radiação de alto brilho, a Luz Síncrotron.

A infraestrutura física necessária para amparar esses equipamentos, provendo-os de todas as especificações e parâmetros de operação, demandou um projeto de física e engenharia com características singulares e inéditas na engenharia brasileira. Desde a tecnologia dos componentes elétricos e mecânicos, até a construção da edificação, exigia-se alta estabilidade com relação a vibrações mecânicas e variações de temperatura. A área onde o prédio foi construído passou por diversos estudos de subsolo, bem como várias análises e protótipos das fundações, pisos e da estrutura. Todo este esforço visou garantir o mínimo de propagação de vibrações aos componentes do laboratório. A estrutura do prédio em concreto armado, o conjunto da cobertura e os sistemas elétricos e de refrigeração foram projetados para minimizar ao máximo as deformações da ação do vento e variações de temperatura. Todas estas especificações e desenvolvimentos tecnológicos, sem precedentes na engenharia nacional, foram realizados com a equipe do próprio Sirius e empresas nacionais (CNPEM, 2014).

2. DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS

Um dos maiores desafios da geração da Luz Síncrotron é a estabilidade. O feixe de elétrons que permanece girando dentro do anel de armazenamento em velocidade próxima à da luz possui em alguns trechos 1,5 micrômetros de tamanho. Como comparação, as células vermelhas do sangue humano têm de 6 a 7 micrômetros de diâmetro. Este feixe de partículas precisa percorrer uma trajetória de 518 metros de circunferência, a uma velocidade de 600.000 voltas por segundo. Durante uma volta, o feixe de elétrons não pode variar sua trajetória em mais de 10% de seu tamanho (CNPEM, 2014).

A estabilidade na velocidade e trajetória dos elétrons é garantida por um conjunto de eletroímãs de diferentes características e funções que gera uma rede magnética. É de extrema importância que haja uma conformidade entre a rede projetada e a realizada, o que resulta em tolerâncias rígidas de construção, pois quaisquer variações dimensionais ou deformações nos elementos de suporte da estrutura podem afetar sobremaneira a qualidade da luz. Esta necessidade de grande estabilidade remete a uma preocupação extrema com as características dos elementos de suporte da rede magnética, as chamadas Bases.

Estas Bases são elementos rígidos que são instalados e aderidos ao piso do laboratório e são responsáveis por dar suporte ao conjunto de eletroímãs e equipamentos que compõem o Anel de armazenamento. Além da responsabilidade de suportar a rede, as bases devem contribuir para evitar propagação de ressonâncias mecânicas entre as estruturas do anel e o piso.

Para o Projeto Sirius, a equipe de projeto optou pela produção de bases de concreto pré-fabricado, em razão de sua elevada resistência

mecânica e baixo custo. Porém, para mitigar a ressonância (vibração) houve a restrição em relação ao elevado módulo de elasticidade e a precisão dimensional, entre outras características especificadas. Foi necessário o estabelecimento de rigorosos controles de fabricação e validação dos resultados, visto que quaisquer variações nos resultados pretendidos poderiam afetar o desempenho do projeto, tanto nas etapas de montagem quanto na etapa de funcionamento do laboratório.

2.1 Projeto e produção da fôrma para as bases

Para dar suporte à linha do anel foram necessárias 84 bases com dimensões de 350 x 90 x 63 [cm], 42 bases de 260 x 90 x 63 [cm] e 7 bases de 400 x 90 x 63 [cm], que foram posicionadas sobre o piso em concreto armado com 90 cm de espessura e tolerância dimensional de ± 2 mm — base de concreto pré-fabricado sob o modelo já utilizado pelo CNPEM (Figura 3), sendo que esse conjunto faz parte do acelerador de elétron e não poderia intensificar vibrações no mesmo.

O primeiro desafio foi desenvolver o projeto da fôrma das bases que atingisse ao final da produção variação dimensional ≤ 2 mm em todas as direções. O projeto foi desenvolvido pela equipe técnica de uma



FIGURA 3

PROJETO SIRIUS – SEGMENTOS DE IMÃS E APOIO METÁLICO SOBRE A BASE MODELO CNPEM DE CONCRETO PRÉ-FABRICADO DE ELEVADO MÓDULO DE ELASTICIDADE

FONTE: CNPEM (2014)

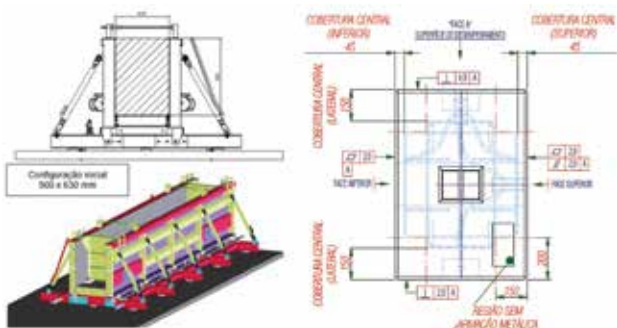


FIGURA 4
PROJETO DAS FÔRMAS METÁLICAS PARA AS BASES

FONTE: PRÓPRIO AUTOR (2017)

indústria brasileira, junto a uma empresa italiana com fábrica no Brasil, para concepção de fôrma metálica (Figura 4).

O principal aspecto de uma fôrma é atender às necessidades de produção, sejam elas: capacidade produtiva, produtividade, precisão geométrica, aspecto estético e até mesmo a versatilidade dimensional e geométrica. Neste projeto, o principal desafio foi o de possibilitar o emprego de uma fôrma que pudesse garantir a produção de 3 vigas por dia, com uma exclusiva tolerância dimensional, facilidade de uso e emprego de vibradores fixos à fôrma.

2.2 Concreto e controle tecnológico

A premissa do projeto, apresentado pela equipe do CNPEM (2014), era a de desenvolver o concreto pré-fabricado para as bases com resistência à compressão acima de 100 MPa e a condição de contorno principal foi restrita ao módulo de elasticidade tangente inicial. Era desejável o maior valor possível, objetivando inicialmente 60 GPa necessários para o amortecimento de ondas (vibração) *versus* o ponto de ressonância, pois quanto maior o módulo de elasticidade, mais alta a faixa de frequência natural e o seu amortecimento (MEZZOMO & MORAES, 2020).

Para atingir esses valores, optou-se por desenvolver o traço para UHPC (*Ultra High Performance Concrete*). O UHPC é um compósito otimizado no seu empacotamento, podendo atingir resistências acima de 150 MPa (ACI 239: 2018). Com relação água/cimento extremamente baixa, pôde-se obter um concreto livre de macroporos, o que possibilitou obter resultados de

módulo acima de 45 GPa (ENAMI, 2017), buscando a otimização do volume de pasta para gerar o maior desempenho de módulo, a partir da abordagem conceitual desta em ser a pasta o elemento de menor desempenho no tema (AÏTICIN, 2000).

Para obter esses parâmetros,

utilizou-se a técnica de empacotamento do método de *Puntke* para definir a fração de finos. Esse método consiste em uma sequência experimental que otimiza a configuração de preenchimento de partículas finas de diferentes diâmetros, ou seja, diminuindo os vazios das composições de partículas de agregados miúdos. Com a variação desta composição dos agregados miúdos é possível avaliar qual a composição com a menor demanda de água, refletindo o maior empacotamento (PORTELLA, RO-

TABELA 1
DOSAGEM E CARACTERÍSTICAS
DO CONCRETO PARA AS BASES

Insumos	kg/m ³
Aglomerantes	483
Fração de filler e areias	684
Agregados graúdos Brita 0 e Brita 1	1388
Teor de água e Superplastificantes	≤ 125
Massa teórica (kg/m ³)	2680
Relação água/aglomerantes	≤ 0,25
Teor volumétrico de argamassa	47,1%
Teor de ar aprisionado	≤ 0,5%
Consistência: autoadensável	Classe SF1

FONTE: PRÓPRIO AUTOR (2017)

DRIGUES & PEREIRA, 2019; ZAVICKIS *et al.*, 2020; GAUR, ATTRI & SHUKLA, 2017).

No projeto, foram realizados dezenas de ensaios com diversos materiais finos elencados para determinar o melhor desempenho quanto ao atendimento da resistência, da trabalhabilidade, da disponibilidade regional e da viabilidade financeira.



FIGURA 5
ASPECTO DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL SF 1

FONTE: PRÓPRIO AUTOR (2017)

Como aglomerantes, foram empregados cimento CPV ARI, trivial na produção dos elementos pré-fabricados e sílica ativa.

Para a fração de agregados graúdos, foi avaliada e projetada a maior compacidade, com fração de agregados miúdos e materiais finos, empregando o Modelo de Funk e Dinger. Definiu-se, então, o emprego de diabásio da região de Campinas/SP, que apresentam alto módulo de elasticidade, para agregados britados: brita 1 e *filler*. Para a fração de areia britada e de pedrisco, foi empregado rocha granítica da região de Itatiba/SP, além de areia fina eólica natural de quartzo da região de Anhembi/SP.

O objetivo inicial da dosagem empregando os diferentes métodos foi obter concreto com menor volume possível, visando o maior desempenho para o módulo de elasticidade e no contraponto à sua aplicação e adensamento para redução dos vazios. Os dados da dosagem definida a partir das sequências de desenvolvimento são expostos na Tabela 1.

Com o emprego de superplastificantes à base de éteres policarboxilatos de alto poder de dispersão, foi possível produzir as remessas de concreto com espalhamento no limite superior da classe SF1 da ABNT NBR 15823-1 (2018), com bom aspecto, sem segregações ou exsudações, atendendo a classe *IEVO* do Índice de Estabilidade Visual indicada na referida Norma Técnica, ressaltando a baixa quantidade de pasta da mistura.

Ainda, o fator da escala de produção, do ambiente de laboratório para a energia de homogeneização do misturador planetário, ao passo das diferentes sequências de produção do concreto (Figura 5) — sequência de entrada dos materiais com o controle do tempo de homogeneização, entre outros procedimentos — possibilitou que o teor efetivo de água, seguindo as especificações da ABNT NBR 12655 (2022) ficasse igual ou menor que 100 litros por m³.

Os resultados do controle tecnológico atenderam às premissas da equipe do CNPEM e, referem-se à média para idade de 28 dias do controle tecnológico de produção, para amostras submetidas à cura úmida e retificadas, ensaiadas no laboratório da fábrica da própria indústria que produziu as bases com resistência à compressão de 123,1 MPa (ABNT NBR 5739: 2018).

Em relação à caracterização mecânica, o alvo especificado foi o módulo de elasti-



A



B



C

FIGURA 6

(A) USO DE BALANÇA RODOVIÁRIA PARA DETERMINAÇÃO DA MASSA DAS BASES; (B) POSICIONAMENTO DAS PEÇAS PARA LEITURA; (C) ENSAIO DO MÓDULO FLEXIONAL EM EXECUÇÃO

FONTE: PRÓPRIO AUTOR (2017)

cidade vibracional, determinado em peças (bases) amostradas de cada lote das 126 bases (elementos) pela técnica de excitação por impulso da ASTM E1876 (2015), pelos métodos dinâmico longitudinal e dinâmico flexional, sendo que os resultados foram $56,6 \pm 0,74$ GPa e $55,8 \pm 1,32$ GPa, respectivamente. Para a determinação das massas das bases, foi empregado balança rodoviária da empresa — com



FIGURA 7

ENSAIO DOS CORPOS DE PROVA PARA DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE PELO MÉTODO FLEXIONAL DA ASTM E1876 (2015)

FONTE: PRÓPRIO AUTOR (2017)

certificação INMETRO (Figura 6a, 6b e 6c), sendo indicado então a média e desvio padrão dos resultados a seguir.

O módulo de elasticidade também foi determinado em corpos de prova dos concretos dos lotes das bases amostradas pelo método flexional da ASTM E1876 (2015), apresentando como resultado valor igual a $56,4 \pm 1,09$ GPa (Figura 7).

2.3 Produção das fôrmas, concretagem, desforma e cura

Para a liberação das fôrmas à produção, as faces foram submetidas à leitura por *laser scanner* para a validação e correção (quando necessárias) do alinhamento e planicidade, como demonstram as leituras da Figura 8.

No passo de produção sistêmica, mostra-se, na Figura 9, o preparo das fôrmas e locação dos inserts para, na sequência, realizar a inspeção de geometria da forma das mesmas.

A inspeção inicial das fôrmas era realizada através de esquadros metálicos e trena a laser (Figura 10).

Após as inspeções e a liberação da conformidade das fôrmas, eram posicionadas as armações e reconferido o posicionamento das alças de içamento (Figura 11).

Na sequência, o concreto era lançado por caçamba e o adensamento feito com os vibradores elétricos de imersão e os pneumáticos de forma. Após a concretagem, realizou-se o acabamento da face de enchimento (Figura 12).

Após a idade de dois dias, eram realizadas as desformas e os saques das peças com auxílio de ponte rolante, sendo neces-



FIGURA 9

PREPARO DAS FÔRMAS E LOCAÇÃO DOS GABARITOS

FONTE: PRÓPRIO AUTOR (2017)



FIGURA 10

INSPEÇÃO DA GEOMETRIA E DIMENSÃO DAS FÔRMAS

FONTE: PRÓPRIO AUTOR (2017)



FIGURA 11

POSICIONAMENTO DA ARMAÇÃO

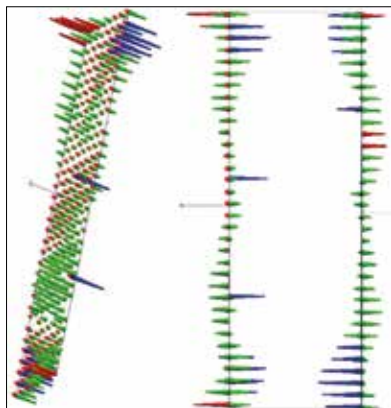


FIGURA 8

EXEMPLO DAS LEITURAS POR *LASER SCANNER* NAS FACES DAS FÔRMAS ANTE A LIBERAÇÃO PARA A PRODUÇÃO

FONTE: PRÓPRIO AUTOR (2017)



FIGURA 12

ARMADURA POSICIONADA E LANÇAMENTO E ADENSAMENTO DO CONCRETO

FONTE: PRÓPRIO AUTOR (2017)

sários cuidados especiais de proteção no ponto de saque para não danificar as peças, utilizando-se de madeira e borrachas para a movimentação (Figura 13).

O processo de cura foi realizado, inicialmente, com manta geotêxtil úmida. Na sequência, as bases eram armazenadas em local protegido até a etapa de preparo para embalagem e transporte (Figura 14).

2.4 Acabamento e validação tridimensional das bases

Após o saque e a cura das bases, estas foram lixadas manualmente para limpeza superficial com lixa d'água 220 e os chanfros também tratados. Todas as peças foram inspecionadas e validadas. Para as dimensões, realizou-se leitura tridimensional a *laser track*, controle desenvolvido pela indústria de pré-fabricados, para atender à criticidade exigida pelo projeto (Figura 15).

As leituras realizadas mostram que os requisitos dimensionais solicitados pelo CNPEM, com tolerância máxima de 2 mm em todas as dimensões, foram atendidos (Figura 16a e 16b).

Além do controle e exposição por área, a técnica empregada possibilitava a visualização em pontos – tipo malha, e a sua comparação aos limites (tolerâncias) dimensionais (Figura 17).

A Tabela 2 apresenta os desvios e valores medidos para uma base. Para o controle dimensional, utilizou-se malha retangular de pontos do tipo 100 x 100 mm, em cada face. Para minimizar o número de saltos (leituras), foram utilizadas duas estações de *laser tracker*, em no mínimo cinco pontos de referência.

2.5 Pintura de resina especial, embalagem, transporte e instalação

Como requisito, a equipe do CNPEM solicitou pintura com resina especial, para fixação das bases dos ímãs com emprego de adesivos (sem fixação mecânica), necessários para redução do potencial de ressonância.

Outro requisito do CNPEM para o projeto foi que, para o transporte e a armazenagem no canteiro de obras, as bases deveriam estar embaladas e sobre *pallets* para melhor preservar a resina e a limpeza da peça (Figura 18).

A Figura 19 mostra as bases instaladas no laboratório e recebendo os equipamentos para montagem do conjunto de eletroímãs e demais equipamentos que compõem o sistema.



FIGURA 13

DESFORMA E DETALHE DE PROTEÇÃO DE MADEIRA E BORRACHA PARA SAQUE

FONTE: PRÓPRIO AUTOR (2017)



FIGURA 14

ARMazenamento das bases (à esquerda) e cabine de acabamento e aplicação de resina (à direita)

FONTE: PRÓPRIO AUTOR (2017)



FIGURA 15

CONFERÊNCIA TRIDIMENSIONAL DAS BASES COM APARELHO DE LEITURA 3D

FONTE: PRÓPRIO AUTOR (2017)

3. CONCLUSÕES

Os requisitos iniciais demandados pela equipe do CNPEM para o projeto do LNLS Sirius envolviam o desenvolvimento das bases em concreto pré-fabricado, com resistência à compressão acima de 100 MPa, módulo de elasticidade próximo a 60 GPa e elevado controle dimensional. As rotinas e ferramentas adotadas demonstraram

o atendimento aos requisitos solicitados.

O desafio deste projeto, que consistiu em desenvolver e produzir em ampla escala, com controle rigoroso, concreto com baixíssimo teor de água e adequada coesão, foi superado com as análises de materiais disponíveis e dezenas de estudos experimentais. Adotou-se o emprego do Método de *Punkte* para o empacotamento granular da mistura da fração

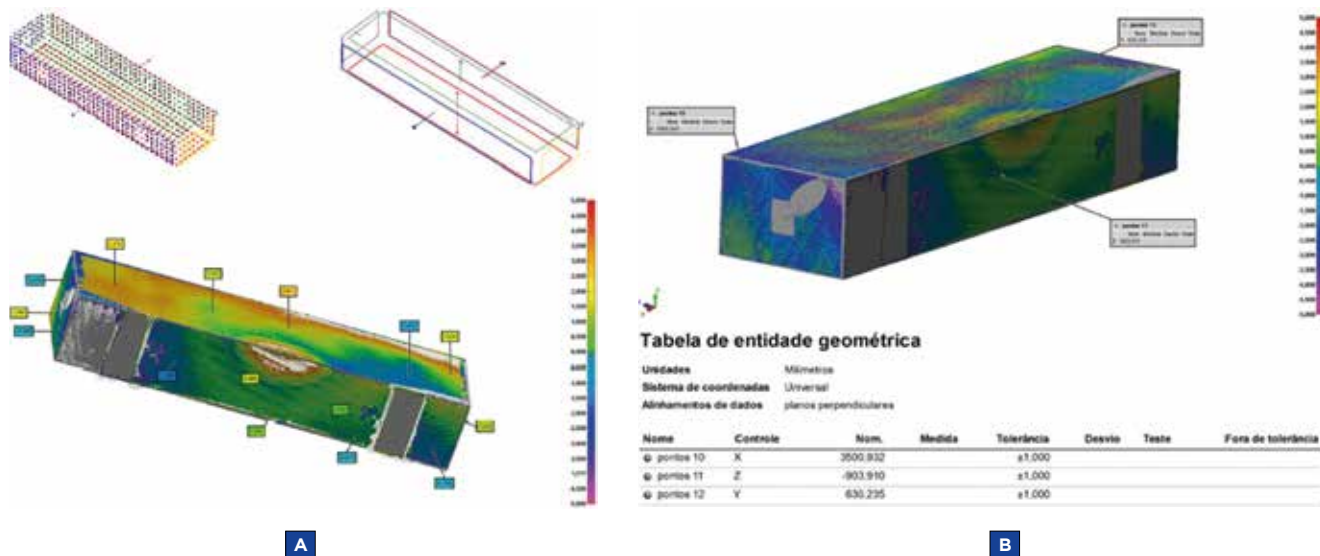


FIGURA 16

COLETA DE PONTOS TIPO MALHA EM TODAS AS FACES; B) TABELA DE ENTIDADE GEOMÉTRICA DOS PONTOS CENTRAIS DAS FACES

FONTE: PRÓPRIO AUTOR (2017)

de finos, resultando em significativa redução da relação água/cimento que é uma característica de concretos de alto desempenho,

conforme pesquisas realizadas (PORTELLA, RODRIGUES & PEREIRA, 2019; ZAVICKIS *et al.*, 2020; GAUR, ATTRI & SHUKLA, 2017).

Inicialmente foi desenvolvida dosagem para obter UHPC, no entanto, a resistência à compressão não foi superior a 150 MPa, requisito mínimo de acordo com o ACI 239:2018 (Enami, 2017; AİTICIN, 2000), obtendo valor médio aos 28 dias igual a 123 MPa em razão da baixa quantidade de pasta adotada para maximizar o módulo de elasticidade. Enfatiza-se, entretanto, que o requisito do projeto de resistência à compressão acima de 100 MPa foi cumprido.

Ponto referencial para o projeto foi a possibilidade de determinar o módulo de elasticidade pelo método pulsônico diretamente nas peças em produção seguindo as especificações da ASTM E1876:2015, com valor médio obtido de $56,6 \pm 0,74$ GPa, comprovando que essa determinação pela excitação vibracional é a mais assertiva quanto à faixa de ressonância do elemento concreto, segundo Mezzomo & Moraes (2020).

Em relação às validações dimensionais, a aplicação da técnica de escaneamento por *laser track* em todas as faces das formas, previamente à concretagem e posteriormente em todas as bases, permitiu avaliar as medidas e demonstrar atendimento às exigências de tolerância mínima de 2 mm para planicidade, paralelismo e perpendicularismo, feito este até então desconhecido para a engenharia nacional de pré-fabricados de concreto.

Importante salientar que a necessidade desta verificação dimensional é incomum na pré-fabricação atual e demandou uso de tecnologia e equipamentos de medição comum à indústria automobilística e aeronáutica. Com os resultados obtidos, o desenvolvimento deste projeto demonstrou a capacidade de se alcançar nível inédito de



FIGURA 17

COLETA DE PONTOS TIPO MALHA

FONTE: PRÓPRIO AUTOR (2017)



FIGURA 18

BASES EMBALADAS COM LONA DE ALTA GRAMATURA E TRANSPORTE PALETIZADO INDIVIDUAL

FONTE: PRÓPRIO AUTOR (2017)



FIGURA 19
BASES INSTALADAS NO LABORATÓRIO SIRIUS PARA MONTAGEM DO CONJUNTO DE ELETROÍMÃS
FONTE: PRÓPRIO AUTOR (2017)

qualidade e precisão em elementos pré-fabricados, gerando assim uma oportunidade de se obter novo patamar de inovação tecnológica e produtos especiais dentro da indústria da construção civil.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos aos fornecedores MC BAUCHEMIE, aos Engenheiros Renato Lopes (*in memoriam*), José Emanuel e Doutor Holger Schmidt, pelo apoio no desenvolvimento dos traços de concreto. Agradecimentos a Bianchi Formas, pelo desenvolvimento das fôrmas utilizadas no projeto e à ATPC Engenharia Física pelos ensaios tecnológicos realizados.

TABELA 2
VALIDAÇÃO DIMENSIONAL DE UMA BASE, ADAPTADA DO RELATÓRIO DE LEITURA

Descrição da cota dimensionada	Especificação	Medido	Desvio
1 - Planicidade Plano Datum A	2,000	0,698	0,698
2 - Perpendicularidade	2,000	1,468	1,468
3 - Planicidade	2,000	1,664	1,664
4 - Paralelismo	2,000	1,385	1,385

FONTE: PRÓPRIO AUTOR (2017)

Agradecimentos aos diretores da Leonardi, Eng. João Carlos Leonardi e Eng. Carlos Alberto Gennari, pelo apoio e incentivos nas pesquisas e recursos aplicados no projeto. ©

► REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AÍTCIN, P. C.. Concreto de Alto Desempenho. Editora PINI. São Paulo, SP. 2000.
- [2] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 239: Ultra-High Performance Concrete: An Emerging Technology Report, 2018.
- [3] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E1876: Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration, 2015.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15823-1: Concreto autoadensável. Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco. Rio de Janeiro, 2017.
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12655: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento.
- [7] BRUM, J. A.; MENEHINI, R.. O Laboratório Nacional de Luiz Sincrotron. São Paulo em Perspectiva. SciELO - Scientific Eletronic Library Online. São Paulo, SP. 2002. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/spp/a/dPhyVjpZBrJTgK3CKSgQ4gf/?lang=pt#> . Acesso em: 16 julho 2023.
- [8] CNPEM - CENTRO NACIONAL DE PESQUISA EM ENERGIA E MATERIAIS. Projeto Sirius - a nova fonte de luz síncrotron brasileira. Campinas, out. 2014a. Disponível em: [O_Projeto_Sirius.pdf](https://www.ipea.gov.br/O_Projeto_Sirius.pdf) (ipea.gov.br) . Acesso em: 14 julho 2023.
- [9] ENAMI, R. M.. Reforço de pilares curtos de concreto armado com concreto de Ultra Alto Desempenho. Tese de doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos - EESC/USP, 2017.
- [10] GAUR, T.; ATTRI, R. & SHUKLA, A.. Optimization of Binary Mixes for Ultra High Strength Concrete by Puntke Method. JAYPEE UNIVERSITY OF INFORMATION TECHNOLOGY WAKNAGHAT, SOLAN - 173 234 HIMACHAL PRADESH, INDIA May, 2017.
- [10] GERAISATE, H.; ROVIGATTI, G.; LEÃO, R.. Establishing a metrological reference network for the alignment of Sirius. In: 12th International Particle Accelerator Conference. Campinas/SP. Brazil, 2021.
- [12] MEZZOMO, M. H.; MORAES, A. G.. Determinação do módulo de elasticidade em aço e alumínio através da frequência natural comparado ao ensaio de tração. Revista Matéria. Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200002.1035> . Acesso em: 16 julho 2023.
- [13] PORTELLA, A. C.; RODRIGUES, F.; PEREIRA, R. L.. Avaliação do Método de Puntke para Produção de Concreto de Pós-Reativos. Monografia. Graduação em Engenharia Civil, Campus São José - UNISAL. Campinas/SP, 2019.
- [14] ZAVICKIS, J.; LUKASENOKS, A.; MACANOVSKIS, A., TUPESIS, M.. Optimization of packing of local coarse aggregates for use in UHPC (Ultra-High-Performance Concrete). In: 19th International Scientific Conference Engineering for Rural Development Proceedings. Jelgava, 2020.