



ENTAC 2024

XX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO

Maceió, Brasil, 9 a 11 de outubro de 2024



Aplicabilidade da manufatura digital na obra dos CAICs: resgate da cultura construtiva dos pré-fabricados

Applicability of digital manufacturing in the construction of CAICs: rescuing the construction culture of prefabricated

Ivanilson Santos Pereira

Universidade de São Paulo | São Paulo | Brasil | ivanilson.spereira16@gmail.com

Claudia Terezinha de Andrade Oliveira

Universidade de São Paulo | São Paulo | Brasil | ctao@usp.br

Resumo

O objetivo da pesquisa é explorar possibilidades de aplicação da manufatura digital para o resgate da cultura construtiva e da conservação dos Centros de Atenção Integral à Criança e ao Adolescente | CAICs, projetados pelo arquiteto João Figueiras Lima, o Lelé. Os atributos formais dos pré-fabricados leves em argamassa armada utilizados nesses Centros possibilitam a substituição de componentes deteriorados, mas que requerem técnicas customizáveis para fabricação com melhorias funcionais e adaptáveis a uma trama modular própria. Foram elaborados modelos virtuais paramétricos do sistema construtivo e utilizada a tecnologia de impressão 3D para a criação de modelos físicos reduzidos dos pré-fabricados. O modelo paramétrico viabilizou o aprofundamento cognitivo das soluções construtivas e permitiu a identificação de inconsistências de desenho (projeto) e desempenho (produto) que possam ser previstas, testadas e aprimoradas antes de uma reprodução dos pré-moldados em massa. A impressão 3D favoreceu o entendimento espacial para além da representação gráfica, bem como permitiu investigar soluções alternativas pelo potencial de adaptabilidade dessas construções.

Palavras-chave: Argamassa armada. Fabricação digital. Documentação. Conservação física.

Abstract

The aim of the research is to explore possibilities of applying digital manufacturing addressing the rescue of construction culture and the conservation of the Children and Adolescents Care Centers designed by architect João Figueiras Lima. The formal attributes of the lightweight ferrocement prefabricated components used in these Centers make it possible to replace deteriorated components, which must be manufactured through customized techniques with functional improvements that fits to a particular modular fabric. Virtual parametric models of the construction system were made, and 3D printing technology was used to create small-scale physical models of the components. The parametric model made it possible to delve into comprehension of the construction solutions and identify inconsistencies in design (project) and performance (product) that can be foreseen, tested, and improved before massive production. 3D printing has favored spatial understanding beyond graphic representation, as well as making it possible to investigate alternative solutions due to the potential adaptability of these constructions.

Keywords: Ferrocement. Digital manufacture. Documentation. Physical conservation.



Como citar:

PEREIRA, I. S.; OLIVEIRA, C. T. A. Aplicabilidade da manufatura digital na obra dos CAICs: resgate da cultura construtiva dos pré-fabricados. ENTAC2024. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 20., 2024, Maceió. **Anais...** Maceió: ANTAC, 2024.

INTRODUÇÃO

O objetivo desta pesquisa consiste em explorar possibilidades de aplicação da manufatura digital para o resgate da cultura construtiva dos pré-fabricados leves em argamassa armada utilizados nos Centros de Atenção Integral à Criança e ao Adolescente/CAICs. Esse objeto de estudo, sistema construtivo dos CAICs, representa uma produção de aproximadamente 350 unidades, disseminadas pelo país, remanescentes de um projeto piloto desenvolvido por uma equipe liderada pelo arquiteto João Filgueiras Lima – Lelé (1932-2014), no início da década de 1990.

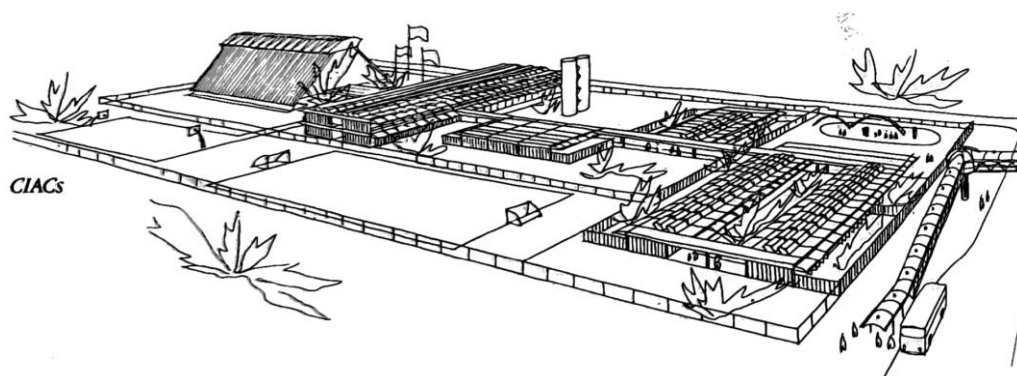
O enfoque adotado justifica-se face à necessidade de investigação de métodos e processos que contribuam para a manutenção das edificações na atualidade, tendo em vista as constantes dificuldades de reparo e/ou reprodução dos pré-fabricados adesão dessa tecnologia que comprometem a conservação física desse acervo edificado. Para tal, enquanto procedimentos metodológicos foram elaborados modelos digitais paramétricos do sistema construtivo e utilizada a tecnologia de impressão 3D para a criação de modelos físicos reduzidos dos pré-fabricados. A seleção desses modelos apoia-se no atendimento a variáveis de controle (dimensional, operacional, logístico) e produção (geometria, seção, materialidade) que são intrínsecas a essas peças.

Dessa forma, reitera-se as abordagens investigativas sob a perspectiva do: produto, pela construção didática ao retomar os atributos formais e funcionais desse patrimônio tecnológico construtivo; e projeto, por meio de propostas que visem à requalificação de componentes e sistemas. Ademais, essas abordagens permitiram um aprofundamento cognitivo das soluções construtivas e a identificação de inconsistências de desenho (projeto) e desempenho (produto) que viabilizam testes, ajustes e aprimoramento antes do início da reprodução em série de pré-moldados não padronizados.

RECORTE DA PESQUISA

Em síntese, destaca-se que os CAICs derivam de um programa nacional disseminado a partir de 1991 (Projeto Minha Gente/decreto nº 139) que previa enquanto meta inicial a construção de 5.000 centros de atendimento à educação em tempo integral para aproximadamente seis milhões de crianças e adolescentes. O desenvolvimento de um projeto piloto (Figura 1) para essas unidades ficou a cargo de uma equipe liderada pelo arquiteto João da Gama Filgueiras Lima, reconhecido por Lelé, que já possuía ampla experiência na fabricação em larga escala de peças em argamassa armada nas chamadas “fábricas de projetos”.

Figura 1: Croqui da proposta para o conjunto arquitetônico do CAIC.



Fonte: Material publicado na Revista AU/Arquitetura e Urbanismo [1].

Entre 1993 e 1994 – pós impeachment do presidente Fernando Collor de Melo, o Ministério da Educação e Cultura/MEC reestrutura a meta estabelecida de implementação da primeira etapa do programa para a construção de 423 Centros, sendo que, naquele momento, apenas 162 haviam sido concluídos [2]. Importante frisar que nesse momento, Lelé e sua equipe já estavam desvinculados do programa por uma série de conflitos de interesses envolvendo empreiteiras e tensões políticas.

Após 30 anos dos desdobramentos que envolveram a primeira fase de implantação dos CAICs é retomado o levantamento dessa produção por meio da construção de um inventário digital que identifica 345 unidades remanescentes do programa inicial [3] – aproximadamente 7% da meta inicial. Atualmente, a questão da conservação física dessas obras torna-se um entrave, tendo em vista a desativação do programa e consecutivamente às dificuldades de gerenciamento e adesão da tecnologia empregada.

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS: DEFINIÇÃO DOS MODELOS

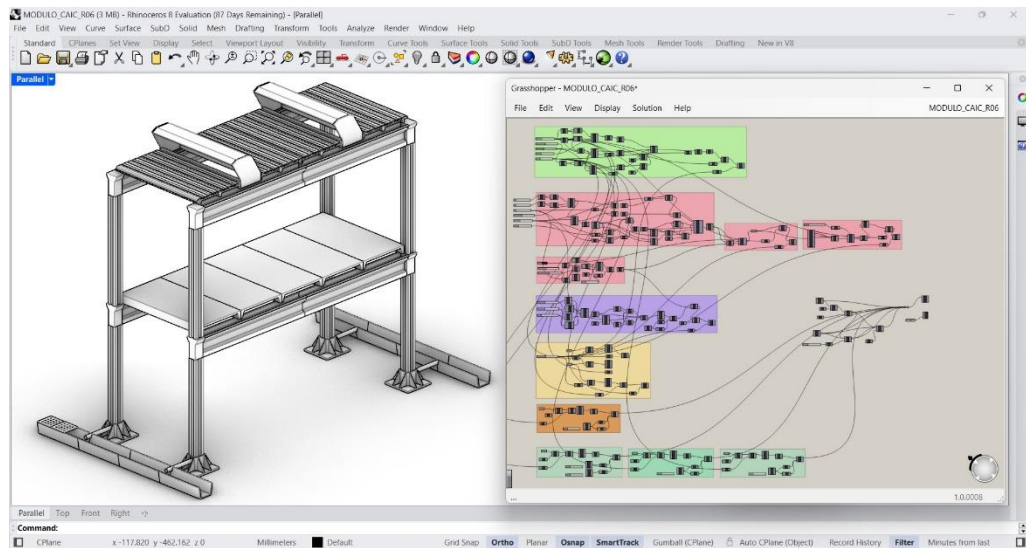
A abordagem metodológica considerou duas vertentes: a elaboração do **modelo digital**, por meio do processo de modelagem paramétrica; e a produção do **modelo físico reduzido**, pelo processo de manufatura aditiva [4].

A modelagem paramétrica possuiu por objetivo explorar o processo de registro por meio do uso de ferramentas digitais para auxiliar no entendimento das soluções construtivas dos complexos educacionais dos CAICs. Adotou a parametrização enquanto recurso para documentação arquitetônica de seus componentes que mantém entre si relações dimensionais [5].

Estas relações são obtidas durante as operações no software Grasshopper® que, por sua vez, espelha os resultados automaticamente para o software de modelagem tridimensional Rhinoceros 3D® – permitindo uma visualização em tempo real do produto obtido. Os principais parâmetros definidos estão relacionados ao dimensionamento básico desses componentes: comprimento, largura, altura e espessura. Contudo, a depender da complexidade do objeto modelado (Figura 2), são

introduzidos novos parâmetros, tais como: espaçamento, raio, quantidade, profundidade etc.

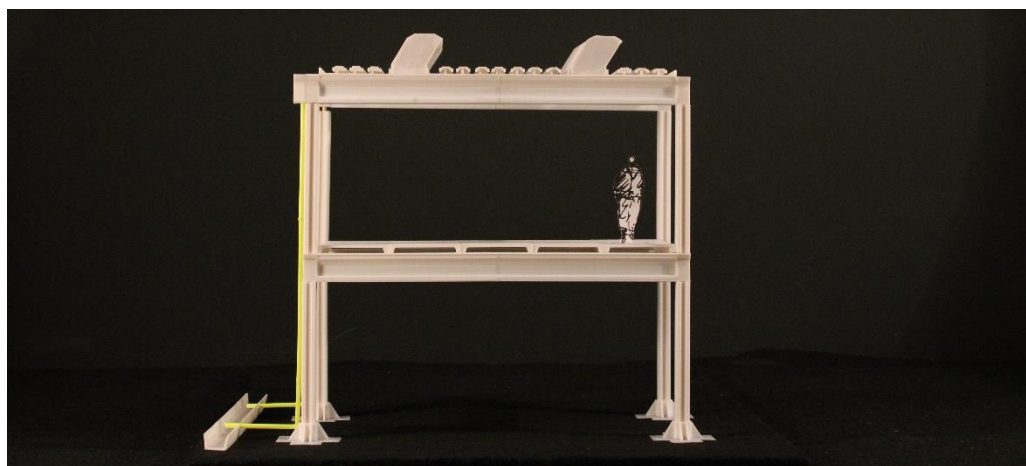
Figura 2: Modelagem paramétrica do módulo construtivo do CAIC



Fonte: Autor, 2024.

A prototipagem correspondeu à etapa de produção de um modelo físico reduzido (Figura 3) com o propósito fundamental de estudar a funcionalidade e desenho geométrico das intervenções a serem propostas nos componentes determinados na fase anterior. Nesta etapa foram testadas alterações de projeto dos componentes que visavam resolver problemas pontuais de desempenho nos sistemas analisados, a exemplo do escoamento da água pluvial nas vigas-calha.

Figura 3: Modelo físico do módulo construtivo do CAIC



Fonte: Autor, 2024.

A prototipagem recorre a um conjunto de técnicas que podem ser utilizadas para a produção de maquetes em escalas reduzidas ou protótipos em escala real. De maneira geral, esses métodos se referem a processos automatizados que possibilitam a

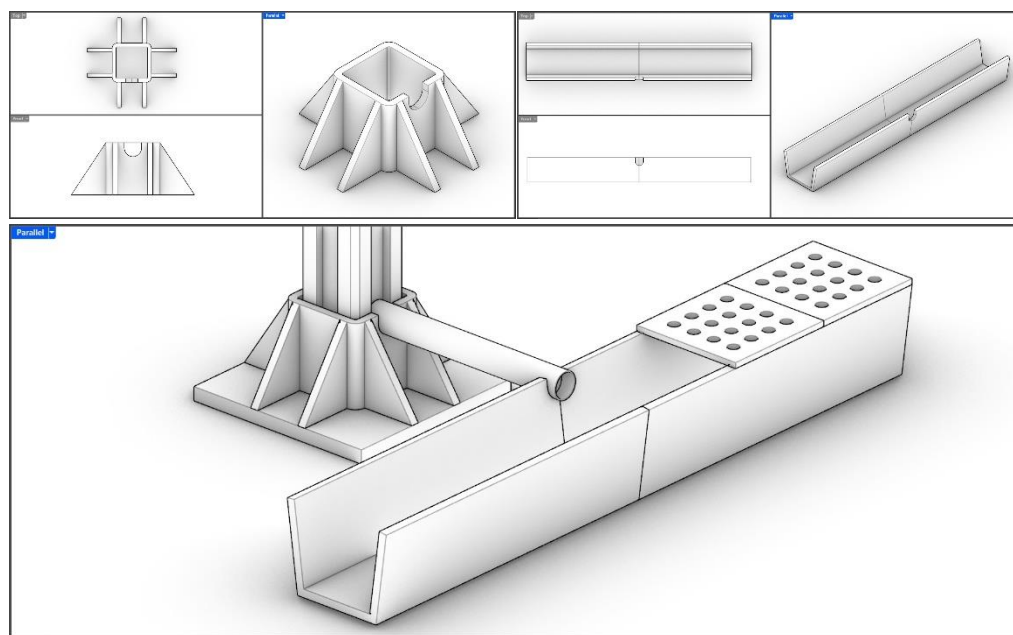
transição do modelo digital para o físico. Para essa etapa do estudo, por se tratar de modelos reduzidos que visam estudar o desenho e desempenho dos componentes foi adotado, para a produção do modelo físico, o processo aditivo de impressão com filamento polimérico em impressoras 3D.

RESULTADOS

MODELAGEM PARAMÉTRICA: MODELO DIGITAL

A exposição inicial reflete sobre os componentes que integram o sistema de fundação (Figura 4). Para os cálices das sapatas foram feitas, inicialmente, as definições dimensionais nos eixos ($x=25\text{cm}$, $y=25\text{cm}$ e $z=30\text{cm}$) que se associam respectivamente às relações de largura, comprimento e altura.

Figura 4: Modelagem dos componentes da fundação. Acima: planta, vista e perspectiva do cálice de fundação com aletas e caneleta para escoamento de águas pluviais. Abaixo: perspectiva do arranjo dos componentes da fundação e da drenagem de águas pluviais.



Fonte: Autor, 2024.

Após isso, são delimitadas a espessura (3cm), comum a todos os componentes, bem como o raio de canto da base (1cm) – pois o projeto original representa cantos arredondados, mas não indica o raio da curva. Com esses parâmetros já é possível conceber seções de base retangular com diferentes combinações de comprimento e largura, ou simplesmente atribuir a base quadrada com a repetição dos mesmos algoritmos.

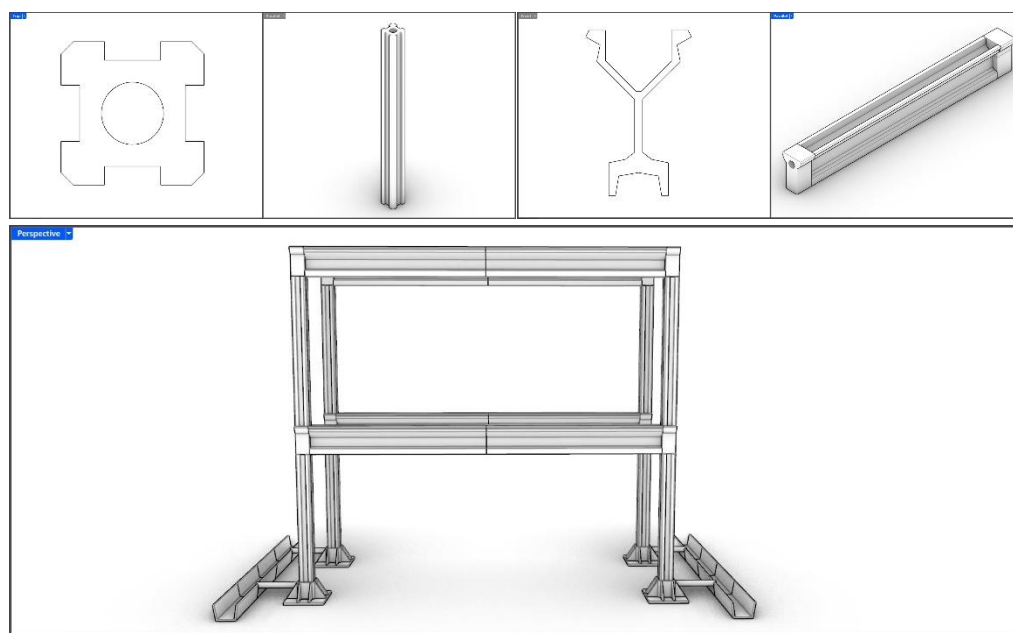
Além disso, foi realizada a parametrização das aletas que servem de apoio a sustentação do corpo principal do cálice. Optou-se por variar o distanciamento entre as nervuras (duas nervuras para cada face do cálice), e manter fixo o distanciamento

entre elas (20cm), considerando que na concepção original elas são posicionadas na concordância entre a reta e a curva dos vértices do cálice. Por fim, são definidas a posição e as dimensões do rasgo para passagem do duto de drenagem das águas pluviais. São delimitados parâmetros para o diâmetro (10cm) e para a profundidade (10cm) que o rasgo possui em relação ao topo do cálice.

A modelagem das canaletas levou a dimensões regulares de sua seção em “U”. Foram definidas três relações dimensionais: a largura da base (14cm), a largura de topo (18cm), que condiciona a inclinação das faces laterais e a altura (25cm), medida a partir do eixo longitudinal do componente. De forma análoga ao cálice de fundação, esses componentes possuem um rasgo para encaixe dos dutos pluviais, fazendo a conexão direta entre a fundação e a drenagem.

Tratando-se do sistema estrutural, no que se refere aos componentes da superestrutura, é abordada a modelagem paramétrica do pilar e viga-calha (Figura 5). A seção do pilar é construída, em um primeiro momento, pela formação da sua geometria base de um prisma quadrangular. Com a seção de base definida (eixos x e $y=24$ cm), integra-se o controlador para o eixo z , definindo assim a parametrização para altura do componente (260cm).

Figura 5: Modelagem dos componentes da superestrutura: pilar e viga-calha.



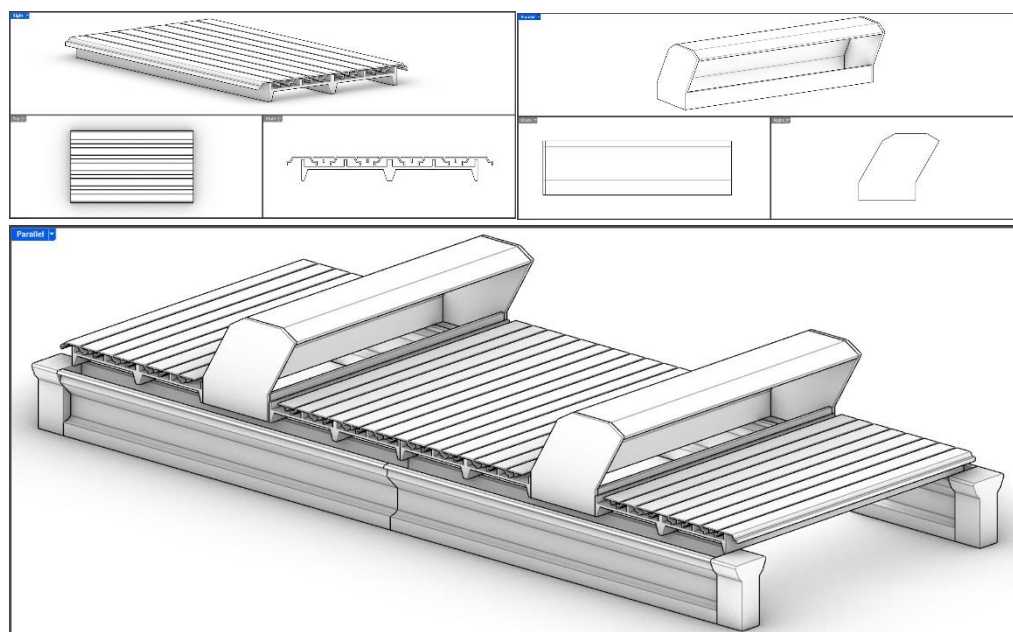
Fonte: Autor, 2024.

Em seguida, são aplicados os parâmetros que conformam as reentrâncias nas quatro faces do componente. Com a delimitação das áreas chanfradas nos cantos da seção (2cm), são articulados os espaços de abertura (9cm) e profundidade (3cm) entre eles. Esses controles permitem alternar dimensões e relações dessas reentrâncias laterais, no entanto deve-se respeitar limites da seção transversal que não afetem o desempenho estrutural do componente.

A modelagem das viga-calha que, apesar da complexidade, seguiu o procedimento adotado para a modelagem do pilar. Vale destacar que o comprimento da viga-calha (625cm), tornou-se um parâmetro gerador de um módulo dimensional, ou seja, define o distanciamento entre pilares, canaletas e sapatas, por exemplo.

Por fim, foram modelados os componentes do sistema de cobertura (Figura 6). Tanto a laje de cobertura, quanto as telhas (capa e canal) e os sheds, possuem seções transversais específicas e com isso adotou-se a parametrização de comprimento enquanto atributo principal de controle paramétrico.

Figura 6: Modelagem dos componentes da cobertura:



Fonte: Autor, 2024.

Foram necessárias adaptações paramétricas de controle para disposição dos componentes da cobertura no modelo. Para tal, foi adotada a caixa de função “series” que permite multiplicar um mesmo componente seguindo três atributos de controle: posição inicial da replicação, distanciamento entre os componentes e quantidade total de componentes a serem dispostos em um determinado eixo.

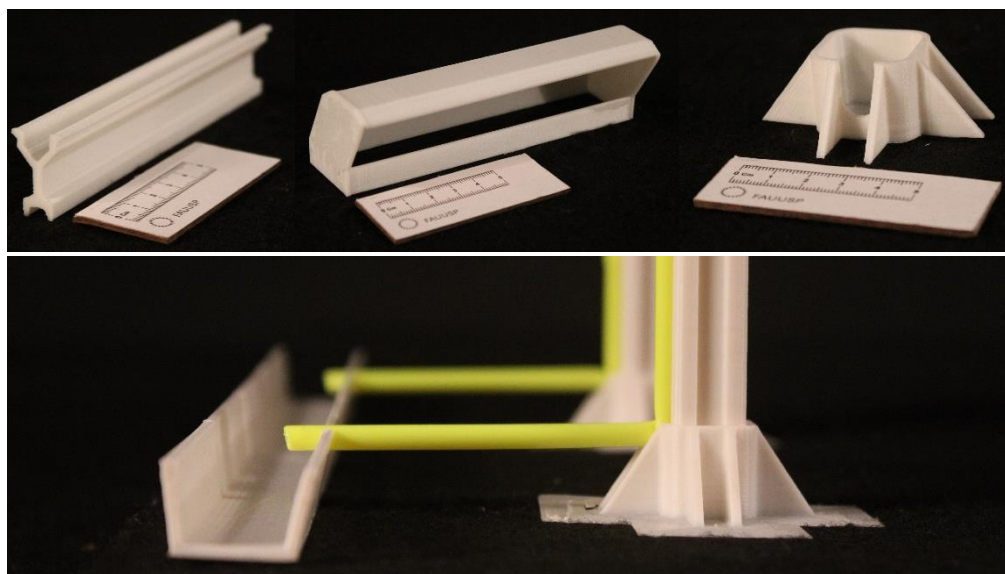
PROTOTIPAGEM: MODELO FÍSICO REDUZIDO

Partindo da compatibilização do modelo paramétrico (digital) para a impressão 3D (física), necessita-se previamente de uma leitura interpretativa de produção das peças de acordo com algumas variáveis do processo de impressão, tais como: configurações e área de trabalho de máquina, duração total e quantidade de material. As impressoras 3D utilizadas pertencem ao modelo S3, desenvolvida e fabricada pela Sethi3D®, e possuem um campo de impressão equivalente a 200x200x200mm. Sendo assim, a escolha da escala do protótipo (1:20) foi definida com base em uma métrica para a

impressão dos componentes, bem como pela adequação com uma dimensão trabalhável para os testes práticos.

Na etapa de impressão das peças, cabem ser destacadas algumas observações quanto ao tempo de impressão e ao consumo de material. Primeiramente, em termos quantitativos, foram produzidos 31 componentes para a produção do modelo reduzido (Figura 7) em intervalos de produção que somam um tempo total de 38h37min44s. Considerando uma produção de, aproximadamente, oito horas por dia, são necessários 5 cinco dias para conclusão da impressão.

Figura 7: Fotografias de peças 3D impressas.



Fonte: Autor, 2024.

Foram utilizados um total de 178,2m de filamentos entre ABS e PLA. Para a produção das peças em ABS foi estabelecida uma configuração de 110°C para a plataforma de suporte – base/cama onde é depositado o filamento e, aproximadamente, 250°C para a temperatura do bico de extrusão – responsável pela fusão do material. Para as peças em PLA manteve-se uma temperatura aproximada de 240°C para a base e uma redução para 60°C para o bico. Essas propriedades são passíveis de serem adaptadas a depender de diferentes processos de impressão.

A impressão e montagem das peças (Figura 8) revela uma concepção didática que está intrínseca a produção de Lelé, expressa pelo seu modo de produção construir que vai desde da concepção, passando por uma exaustiva análise de consistência do desenho dos componentes e de suas relações de fabricação e de montagem, seguida do detalhamento e do planejamento da produção dos componentes até a execução das obras. Um caso nítido dessa compreensão está presente em um documento que o arquiteto elaborou para a construção da escola transitória rural em Abadiânia-GO [6], a retomada desse exemplo é fundamental para o entendimento dos componentes e processos de construção de uma obra de alta complexidade, porém com uma

representação gráfica objetiva (esboços, fotografias e especificações) que se comunica diretamente com o público-alvo.

Figura 8: Fotomontagem com o processo de montagem do protótipo.



Fonte: Autor, 2024.

ABORDAGEM PROJETIVA: DESENHO (PROJETO) E DESEMPENHO (PRODUTO)

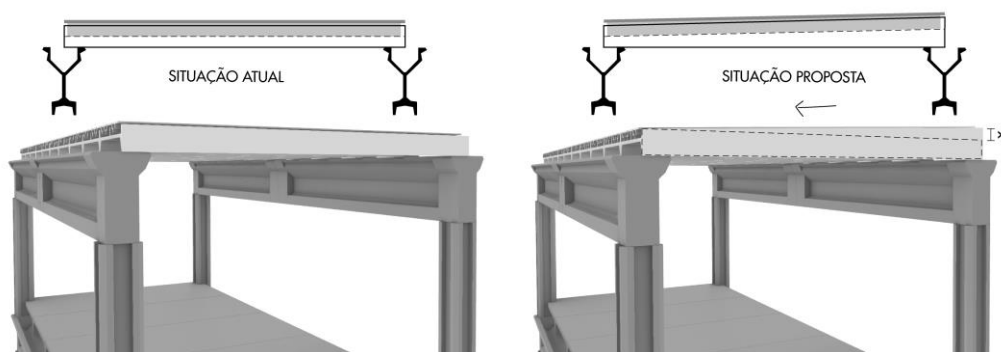
Entre as diversas soluções e inovações que o projeto piloto para os CAICs apresenta, destaca-se a adoção de um sistema de captação, condução e recolhimento das águas pluviais integrado a componentes de sistemas de cobertura, estrutura e fundação. A partir desse entendimento, as águas são recolhidas por uma cobertura plana composta por componentes sobrepostos que desempenham a função de telhas capa e canal, e que direcionam o fluxo para as vigas-calhas.

A partir disso, as águas são conduzidas por tubos de PVC (poli (cloreto de vinila)) embutidos no interior das seções dos pilares externos dos edifícios que estão conectados (em nível de fundação) a canaletas de drenagens que recolhem esse fluxo. Posto isso, é nítido que o desempenho satisfatório desse sistema está condicionado ao atendimento de uma série de variáveis de uso e manutenção, pois sua eficiência está diretamente relacionada ao comprometimento dos componentes de todos os demais sistemas. Sendo assim, uma das maiores problemáticas que interferem na conservação física desses edifícios é proveniente da falta de reparo dos componentes que compõem os sistemas de cobertura, estrutura e fundação associados ao sistema de drenagem de águas pluviais [7].

O estudo previsto para adaptação desses componentes se deu sobretudo no redesenho de suas seções visando o escoamento eficiente e alguns redirecionamentos do fluxo pelos componentes. A princípio, é proposta uma adaptação dimensional no componente da laje de cobertura (Figura 9), de forma a aumentar a declividade dos planos para escoamento das águas pluviais, por intermédio do aumento da altura das

nervuras superiores que sustentam as “telhas” (capa e canal). Essa alteração considera a dificuldade de escoamento da água, verificada em vistorias in loco. Embora tenham um ligeiro declive, não escoam de forma tão eficaz como as coberturas inclinadas. A água tende a se acumular nas coberturas, potencializando a infiltração na estrutura e os danos aos materiais.

Figura 9: Desenho proposto para requalificação de componente da cobertura.

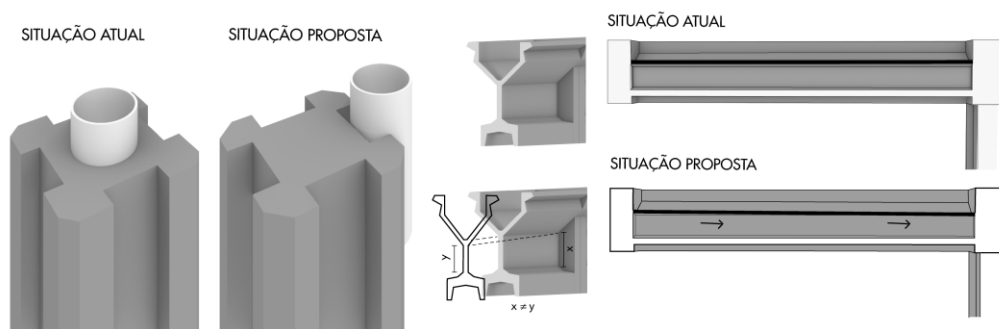


Fonte: Autor, 2022.

No caso das vigas-calhas, a principal adequação de funcionalidade se deu pela proposição de conformação de novas peças com uma maior declividade do fundo da canaleta. Essa alteração aplicada ao processo de fabricação, ou seja, na concepção de fôrmas que já possuam essa inclinação, evita a utilização de outras soluções como, por exemplo, camada de argamassa para restabelecer um plano inclinado para o escoamento das águas pluviais no fundo da viga-calha.

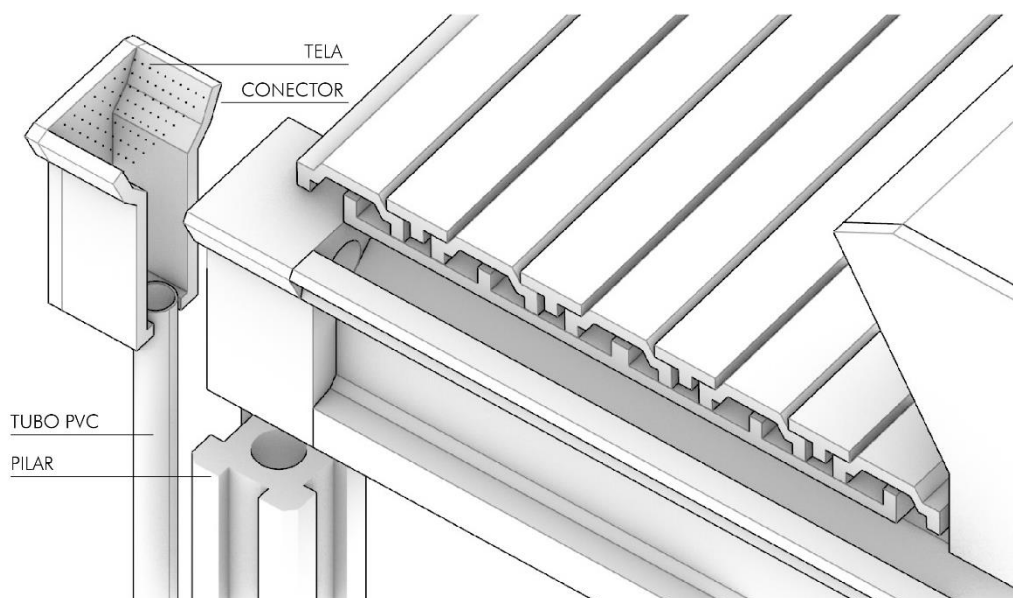
Para os pilares foram indicados: a relocação dos tubos de drenagem que, originalmente estão embutidos, para suas faces externas (Figura 10). Visando acomodar essa nova disposição dos tubos, é previsto o encaixe nas reentrâncias existentes da própria seção. A partir desse reposicionamento foi necessário repensar a ligação viga-pilar. Para isso, foi proposta a inserção de um novo componente que atua enquanto extensão da viga-calha e é conectado com o tubo. O desenho dessa peça alinha-se com a seção da viga-calha de forma a estabelecer uma intervenção mínima na forma já estabelecida (Figura 11).

Figura 10: Desenho proposto para requalificação do sistema de condução pluvial (pilares e vigas-calha).



Fonte: Autor, 2022.

Figura 11: Detalhe esquemático de proposta de conexão para redirecionamento das águas pluviais pelos componentes.

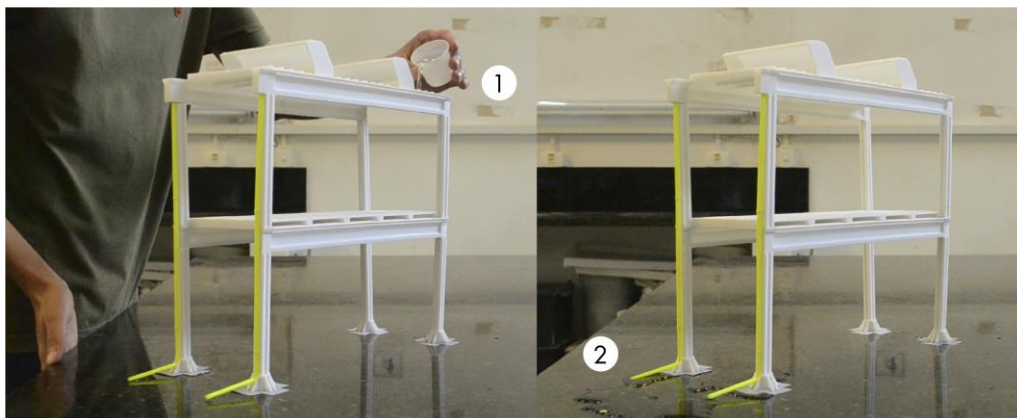


Fonte: Autor, 2024.

Para a verificação de desempenho da intervenção proposta foi realizado um teste de escoamento no protótipo com o intuito de identificar possíveis inconsistências que refutariam o redesenho dos componentes. Em um primeiro momento, o procedimento consistiu em despejar água sobre a cobertura do modelo enquanto uma simulação simplificada para a averiguação da validade da solução.

Um das finalidades do estudo foi analisar se as inclinações adicionadas aos componentes obteriam um resultado representativo ao escoamento do sistema, portanto para a aspersão da água foi selecionado o ponto que representaria o maior percurso para o deslocamento do fluido. Dado início ao experimento, o líquido teve um deslocamento contínuo por todos os componentes do sistema até ser recolhido no ponto de drenagem (Figura 12).

Figura 12: Aplicação do teste de escoamento da água no protótipo. 1 – Ponto de início do experimento; 2 – Ponto de recolhimento.



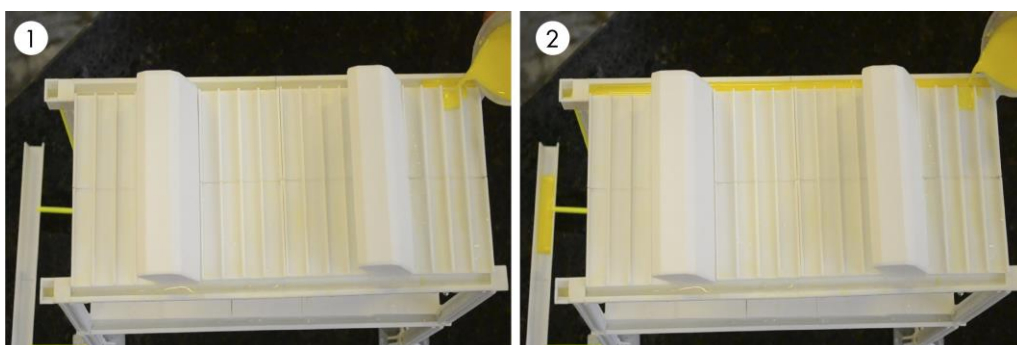
Fonte: Autor, 2024.

Apesar da eficiência obtida, reconhece-se as limitações do método adotado, que não representaria uma precipitação em um cenário real. Contudo, a associação dos componentes respondeu a uma simulação simplificada, sendo o experimento válido para uma primeira leitura qualitativa.

Na sequência, foram realizados estudos específicos para alguns componentes que visavam comparar as soluções originais e adaptadas no que se compete ao escoamento com diferentes inclinações. Os experimentos sugerem que a configuração de um plano com 1% de declividade, no fundo da viga-calha, é viável para a produção dos componentes em verdadeira grandeza por não alterar significativamente a geometria da seção transversal, e que a justaposição aos demais componentes da cobertura também é viável, é mais efetivo do que que possuíram mudanças mais significativas no desenho de seção.

Para evidenciar essa percepção, foi utilizada uma solução de água e corante em pó na cor amarelo para a facilitar a observação do fluído (Figura 13). A justaposição das peças sugere que a solução de continuidade é suficiente para evitar de vazamentos de líquido entre componentes e ligações após o teste no protótipo.

Figura 13: Aplicação do teste de escoamento no protótipo com solução de água e corante.



Fonte: Autor, 2024.

Como premissa de uma representação dessas alterações, associadas a condutas regulares de recuperação desses edifícios, tais como: pintura, limpeza de superfícies, recuperações de fissuras, substituição de esquadrias danificadas, entre outros; foi possível a realização de uma simulação digital tridimensional considerando esses fatores (Figura 14). Destaca-se que as intervenções projetuais não interferem na concepção formal da obra e, ao mesmo tempo, incorporam a funcionalidade a partir do construído.

Figura 14: Reconstrução virtual tridimensional de edifício do CAIC com intervenções projetuais – visão fachada (superior) e pátio entre blocos (inferior)



Fonte: Autor, 2024.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A modelagem paramétrica além da importante contribuição para a documentação dos componentes construtivos, possibilitou uma integração por meio das ferramentas de representação, ajustes dimensionais, compreensão espacial e tectônica do projeto. Na sequência, a prototipagem elucidou o modo de fazer e projetar da obra por meio da experiência prática de manipulação do modelo físico reduzido.

As soluções de adaptação propostas mostraram-se viáveis para a melhoria de determinados componentes e sistemas, tais como: correção do direcionamento das águas pluviais, adição de declividades para facilitar o escoamento da água,

reposicionamento e substituição de componentes, entre outros. São intervenções que não visam esgotar ou sanar as problemáticas de conservação física desses edifícios, mas fornecer um aporte para as discussões sobre as formas de gerir e atuar sobre essas construções.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- [1] LIMA, J. F. CIACs em escala industrial. **Revista AU/Arquitetura e Urbanismo**, n. 37, p. 50-55, agosto de 1991.
- [2] AMARAL SOBRINHO, J.; PARENTE, M. M. **CAIC: solução ou problema?** Brasília: IPEA, 1995. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/pub/td/td_363.pdf>. Acesso em: 29 ago. 2019.
- [3] PEREIRA, I.; AFONSO, A.; OLIVEIRA, C. Gestão do patrimônio arquitetônico: Inventário digital dos CAICs no Brasil. In: Anais do 5º Simpósio Científico ICOMOS Brasil e 2º Simpósio Científico ICOMOS/LAC. **Anais...**Belo Horizonte (MG) UFMG, 2022.
- [4] PEREIRA, I. **Tecnologia da conservação na obra de Lelé: da fabricação digital ao restauro dos CAICs (1990-1994)**. 2024. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.
- [5] PEREIRA, I.; OLIVEIRA, C. Modelagem paramétrica aplicada à documentação de pré-fabricados produzidos por Lelé: o caso dos CAICs. In: AFONSO, A.; LOPES, J. (Org.). **Ecos da modernidade no Norte e Nordeste brasileiro**. São Luís: Centro Universitário UNDB, 2023.
- [6] LIMA, J. F. **Escola transitória: modelo rural**. Brasília: MEC/CEDATE, 1984.
- [7] AFONSO, A.; PEREIRA, I. CAIC José Joffily de Campina Grande: anamnese da obra. **Revista Projetar - Projeto e Percepção do Ambiente**, v. 5, n. 3, p. 155-175, 22 set. 2020.