

5 Sistema construtivo leve

Os experimentos realizados com os painéis sanduiche tanto com miolo de *honey-comb* ou de isopor, com a telha calhetão e com os *brises* de bambu e de barro (ver capítulo 4.1 a 4.3), demonstraram a viabilidade de se atingir os níveis mínimos de desempenho térmico estabelecidos na Norma NBR 15.575. Porém, os resultados indicam que ao buscar painéis de vedação e telhas com espessuras delgadas (ver apêndices 2; 3; 5; 7 e 8), faz-se necessário utilizar elementos externos de proteção solar, como *brises*, para alcançar ao valores de transmitância térmica tolerados para paredes e coberturas.

Na figura 76 estão esquematizadas paredes compostas por painéis sanduiche de fibrobarro com miolo de *honey-comb*, sem proteção externa e com proteção externa. No primeiro painel representado, na cor natural do barro (cor escura), com absorptância à radiação solar elevada, para atender o nível mínimo de desempenho térmico, sua espessura mínima seria de 7,5 cm. Já no segundo painel, de cor superficial clara, com baixa absorptância à radiação solar, a espessura mínima pode ser reduzida para 5,5 cm. Na parede com proteção externa a transmitância térmica (U) a ser considerada é do conjunto *brise*/painel, onde a absorção direta da radiação solar ocorre na superfície externa do *brise*. O resultado obtido para a parede com *brise* de barro foi de: $U = 1,74 \text{ W/m}^2\text{K}$, atendendo com folga o máximo permitido de $U \leq 2,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ para superfícies de cores escuras.

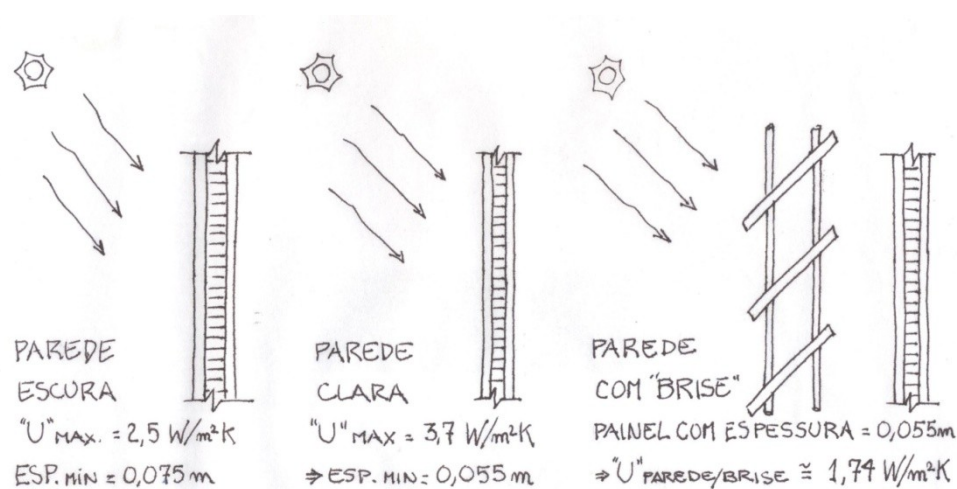


Figura 76: Cortes esquemáticos de paredes com painel de *honey-comb*.

Na figura 77 estão esquematizadas em corte telhas calhetão sem proteção à radiação solar direta e com proteção, através de placas de fibrobarro ou esteiras de bambu apoiadas sobre as bordas, formando uma câmara ventilada. Na primeira telha representada, na cor natural do barro (cor escura), com absorptância à radiação solar elevada, para atender o nível mínimo de desempenho térmico requerido pela Norma NBR 15.575, sua espessura mínima seria de 30 cm. Já na segunda telha, de cor superficial clara, com baixa absorptância à radiação solar, a espessura mínima pode ser reduzida para 14 cm. Na telha com proteção externa pouco importa a sua cor superficial, pois não ocorre a absorção direta da radiação solar. A transmitância térmica (U) a ser considerada é do conjunto placa/telha, onde a absorção direta da radiação solar ocorre na superfície externa da placa de fibrobarro. Neste caso, considerando a espessura da telha de 4cm, como no experimento descrito na Capítulo 4, o resultado obtido foi de $1,88 \text{ W/m}^2\text{K}$, atendendo a exigência para coberturas com superfície em cores claras, porém, ficando aquém da necessidade para superfícies de cores escuras de $U \leq 1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ (ver cálculos nos apêndices 9; 10; 11 e 12).

Nestes conjuntos, parede e telha com proteção externa, caso as proteções sejam de bambu, os resultados são semelhantes: $U = 1,73 \text{ W/m}^2\text{K}$ para o conjunto brise/painel e $U = 1,86 \text{ W/m}^2\text{K}$ para o conjunto esteira de bambu/telha.

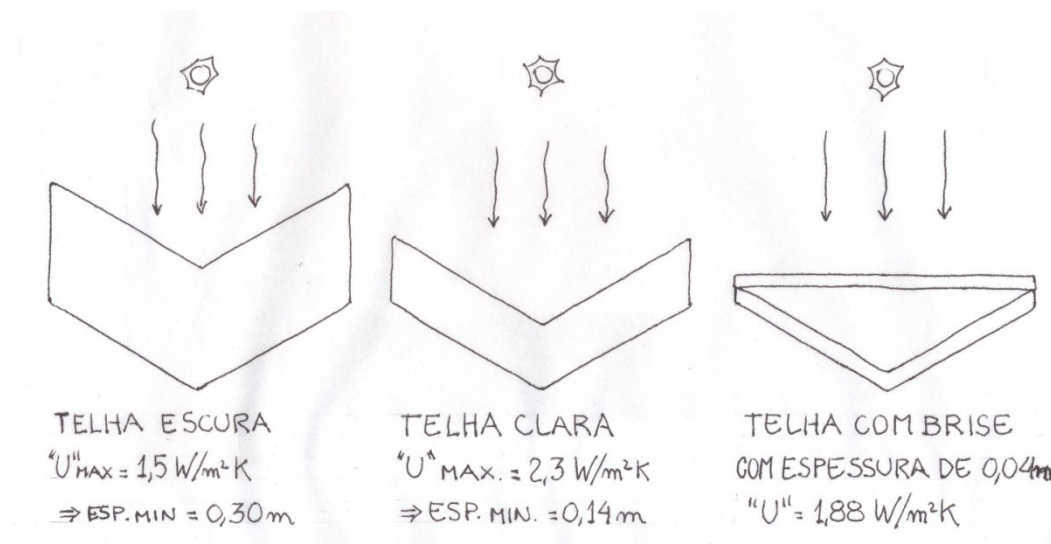


Figura 77: Cortes esquemáticos de telhas calhetão.

Como os resultados apontaram não para materiais específicos, mas sim para um conjunto, onde cada elemento desempenha função complementar, realizaram-

se outros experimentos para compor uma sobrecobertura de modo a abrigar uma construção mais leve, incorporando uma câmara de ar ventilada, cujo sistema construtivo é descrito a seguir.

5.1. Estrutura

A base estrutural é contínua, periférica e composta por feixes de fitas de bambu. Dela nascem as linhas estruturais, também em fitas de bambu, que descrevem a superfície do módulo projetado. Essas fitas, compostas por feixes mais singelos que a base, desenvolve-se num entramado que garante a estabilidade da estrutura, compondo uma superfície de dupla curvatura sem pontos de apoio intermediários.

Como proteção, os feixes de bambu podem ser envolvidos com gaze de algodão, resina poliuretânica vegetal e areia.

5.2. Vedação

O fechamento da estrutura, que resultará numa casca, é em mantas de fibrobarro, com cerca de um centímetro de espessura, aplicadas e fixadas sobre a trama estrutural e emendadas umas nas outras. O acabamento superficial será em pasta cal, para manter a permeabilidade do fibrobarro à umidade do ar, garantir a resistência à exposição direta à água e proporcionar a reflexão da luz no interior. Junto à base, pelo exterior, a estrutura receberá um soco impermeável composto por resina poliuretânica vegetal e areia, aplicado sobre o fibrobarro.

5.3. Sobrecobertura (em desenvolvimento)

O sistema de acoplamento da sobrecobertura à estrutura de bambu que sustenta a forração interna encontra-se em estudo, para que esta interação crie sinergia resultando no aumento da resistência do conjunto, inclusive contra as ações aerodinâmicas do vento.

A sobrecobertura deve ficar suficientemente espaçada da estrutura para garantir o fluxo constante de ar. A face externa terá cores claras, de preferência a cor branca, para maior reflexão da radiação solar. Deve ser leve, impermeável e resistente às intempéries. A cor clara da superfície externa pode ser obtida com

aplicação de resina poliuretânica vegetal pigmentada, neste caso, com adição de areia fina lavada, para proporcionar maior ancoragem e resistência.

Visando ao melhor resultado do isolamento térmico da sobrecobertura recomenda-se, na face interna, a forração com papel alumínio, devido à sua baixa emissividade superficial na faixa do infravermelho.

5.4. Claraboia

No topo da construção ficará a claraboia em estrutura de bambu e fixada, por amarração, ao conjunto estrutural. Será assentada em curva de nível e com altura conveniente à ventilação e iluminação naturais. A cobertura desta claraboia terá seção elíptica para não opor resistência à saída do ar, tanto do colchão abaixo da sobrecobertura quanto do ar interno. Essa seção foi projetada para provocar o *efeito Venturi*¹ em situações de vento, potencializando a sucção do ar interior pela diminuição da pressão devido ao seu estrangulamento. Nas laterais serão colocadas venezianas móveis acionadas por cordames.

5.5. Ventilação natural

O sistema de ventilação se dará, predominantemente, por diferença de temperatura: *efeito chaminé*, com entrada do ar exterior por aberturas baixas e saída pela claraboia zenital. O projeto deve garantir altura mínima de 4m entre o piso e o eixo do vão da claraboia, para melhor funcionamento deste sistema, de modo a possibilitar a estratificação do ar no interior do ambiente. A ventilação cruzada ocorrerá com menos intensidade e frequência, devido à predominância da claraboia. O beiral, com 50 cm de projeção ao redor, protege os seus vãos, porém, no caso de chuva com ventos fortes, as venezianas devem ser fechadas.

5.6. Iluminação natural

A iluminação natural será, principalmente, zenital, ingressando pela claraboia e refletindo pela superfície interna com acabamento em pasta cal, o que

¹ Fenômeno descrito pelo físico italiano Giovanni Battista Venturi (1746-1822). O *efeito Venturi* (também conhecido como *tubo de Venturi*) consiste em que um fluido em movimento dentro de um conduto fechado diminui sua pressão ao aumentar a velocidade depois de passar por uma zona de estrangulamento.

proporciona a distribuição uniforme do nível de iluminamento. Além da proteção do beiral, as folhas das venezianas devem ser pintadas de branco para promover o mascaramento da trajetória do Sol, de modo que não ocorram manchas solares no interior do ambiente.

5.7. Conforto térmico

O sistema é composto por comportas que, nos períodos de calor, permanecem abertas, permitindo a circulação do ar tanto pela câmara formada pela sobrecobertura quanto pelo interior da construção, o que aumenta as perdas de calor por convecção e evaporação.

Nos períodos frios, as comportas e as venezianas da claraboia são fechadas, criando um colchão de ar estanque abaixo da sobrecobertura e interrompendo o efeito chaminé no interior do prédio. Assim, aumenta-se a resistência e diminui às perdas térmicas para o exterior.

Como exemplo ilustrativo do funcionamento desse sistema construtivo, mostramos, a seguir, croquis do projeto “Sala Bolha” (figuras 78, 79 e 80), esclarecendo que se trata apenas de uma solução dentre inúmeras possibilidades de projeto que esse sistema permite.

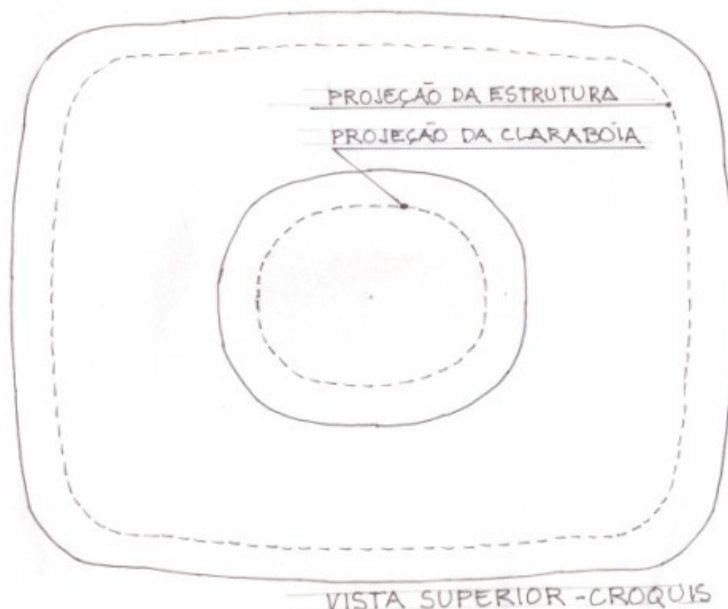


Figura 78: Vista superior mostrando a sobrecobertura e a borda do beiral da claraboia.

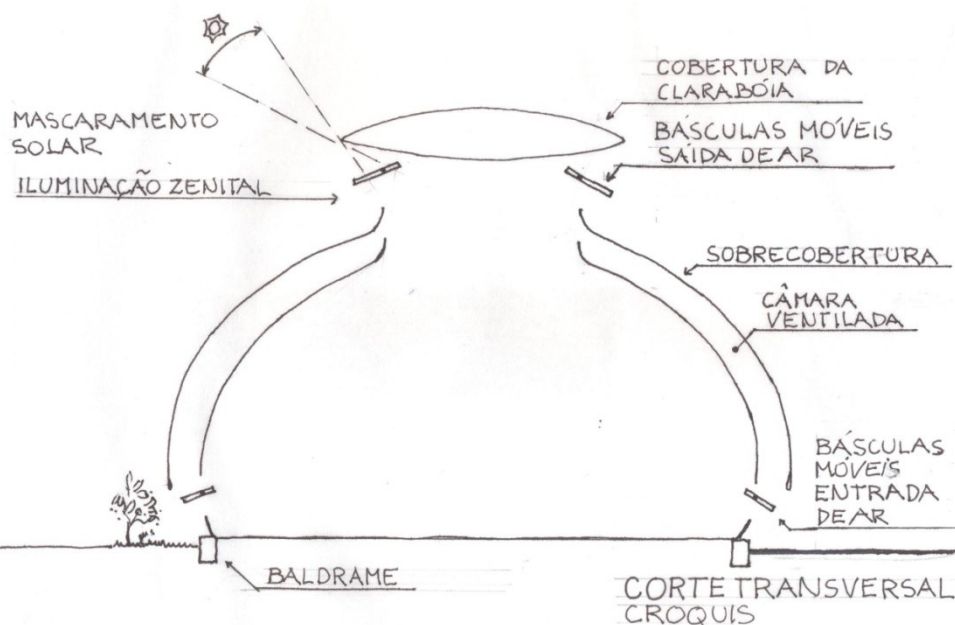


Figura 79: Croquis do corte transversal.

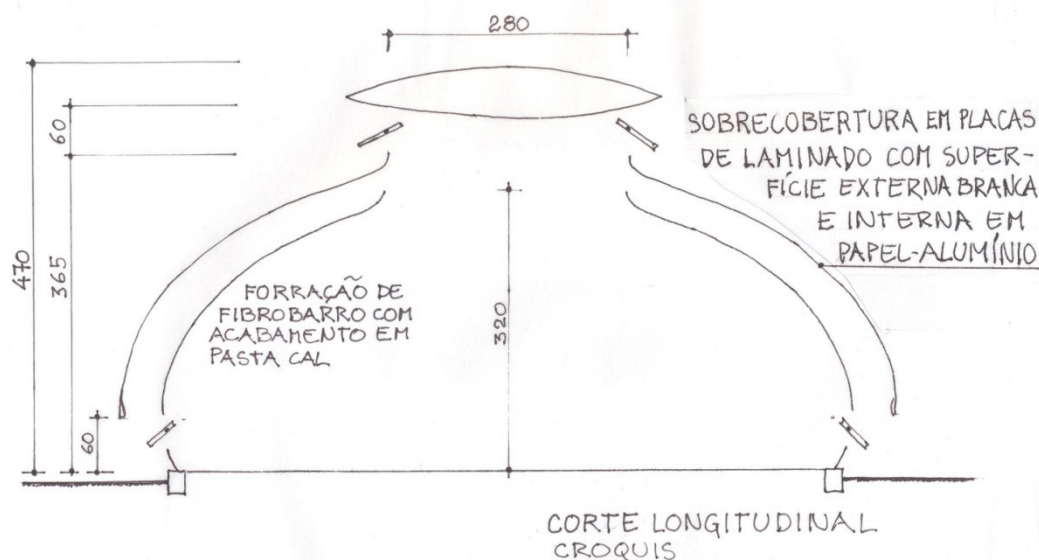


Figura 80: Croquis do corte longitudinal.

Cálculos de transmitância térmica (U) indicaram o valor de $1,80 \text{ W/m}^2\text{K}$ para o sistema com sobrecobertura (ver cálculos no apêndice 13). Este desempenho é equivalente a uma parede de alvenaria emboçada pelos dois lados com espessura total de 24 cm, onde $U = 1,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ e superior a uma parede de tijolos maciços com 27 cm de espessura onde $U = 2,3 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Norma NBR 15.220-3, tabela D3, p. 24 a 27) ou uma parede de concreto armado com 60 cm de espessura onde $U = 1,95 \text{ W/m}^2\text{K}$ (cálculo no apêndice 14).

Devido à passagem do ar pelo vão entre a sobrecobertura e a forração, segundo a Norma NBR 15.220, deve-se aplicar o Fator de telhado (FT) que atribui

uma melhora de rendimento de aproximadamente 12% para um espaçamento de 20 cm (cálculos no apêndice 13).

Este desempenho pode ser otimizado com a instalação de um septo entre a sobrecobertura e a forração interna, dividindo o colchão de ar em duas câmaras ventiladas, aumentando a sua resistência térmica. Neste caso a transmitância térmica do sistema seria reduzida para $1,38 \text{ W/m}^2\text{K}$ (cálculo no apêndice 15). O Fator de telhado ainda pode ser aplicado, considerando duas câmaras com 10 cm de espessura, com melhora de rendimento de aproximadamente 7,8% por câmara.

Mesmo com todas estas barreiras à passagem do calor do exterior para o ambiente interno, num dia quente, onde a temperatura do ar externo for mais elevada do que o admissível na zona de conforto, a temperatura interna também estará acima da zona de conforto. Porém, ainda podemos lançar mão do resfriamento evaporativo nos dias mais quentes dotando a câmara de ar entre o septo e a forração interna de dispersores de água, ou, apenas umedecendo a superfície externa da forração pelo gotejamento d'água.

Assim teríamos uma câmara de ar seca de baixa emissividade superficial de ondas longas entre a sobrecobertura e o septo e uma câmara úmida entre o septo e a forração interna, com temperatura mais baixa do que o ar exterior (figura 81).

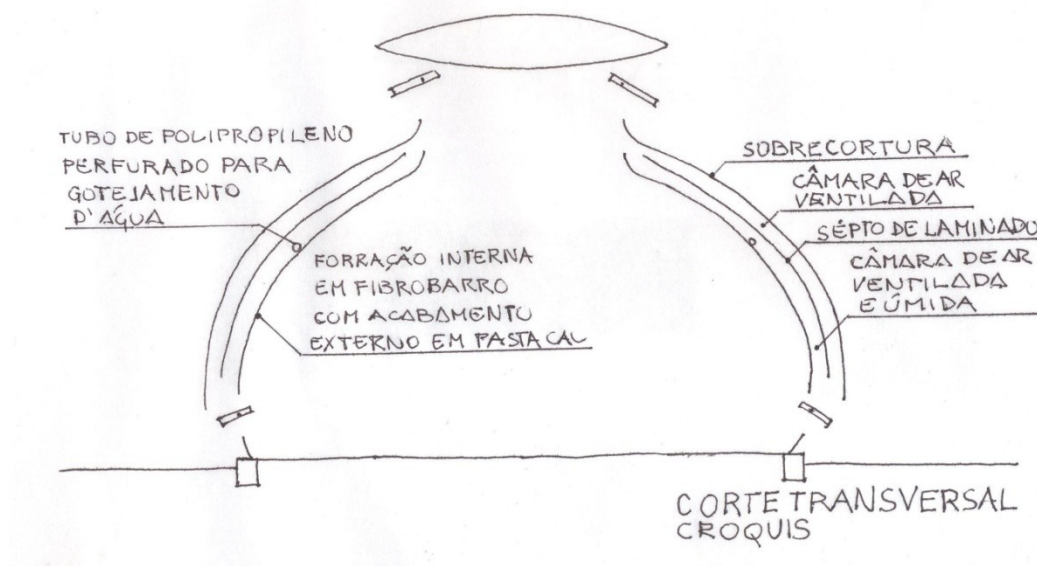


Figura 81: Croquis do septo em corte transversal.

A eficiência do sistema de resfriamento evaporativo será maior quanto menor for a umidade do ar. Mesmo num clima tropical úmido, quando a temperatura do ar estiver mais elevada, acima da zona de conforto, a umidade relativa

estará mais baixa, pois, quanto maior for a temperatura do ar maior será a sua capacidade de reter vapor d'água. Com a dispersão de gotículas d'água no interior da câmara de ar ventilada, sua evaporação absorverá o calor sensível da superfície em que está em contato, abaixando tanto a temperatura do septo quanto a temperatura da forração de fibrobarro revestida com pasta cal e, por convecção, a temperatura do fluxo de ar através desta câmara úmida. Vale lembrar que para um grama de ar evaporar é necessário absorver 2.256 Joules.

A consequência será a diminuição da temperatura do ar no interior da “Sala Bolha” tanto pelas trocas convectivas da forração com o ar interior quanto pelas trocas evaporativas que ocorrerão na superfície interna da forração. Pois, a forração de fibrobarro revestida com pasta cal é permeável ao vapor d'água e a pressão de vapor da câmara úmida migrará pela forração para o ambiente interior.

Quanto ao fluxo de ar através do colchão entre a sobrecobertura e a forração interna considerando um espaçamento de 20 cm, se calculado para a “sala bolha” desenvolvida no item 5.8, obtemos o total de 810 m³/h. Quanto a renovação do ar interno pelas escotilhas e saída pela claraboia obtemos o total de 1.844 m³/h (cálculos no apêndice 16).

5.8. Projeto “Sala Bolha”

5.8.1. Introdução

Consultado sobre a ampliação de um prédio no campus da PUC-Rio alertei que, naquele momento, não estavam autorizados acréscimos de área construída, devido a pendências no âmbito da legislação edilícia. Como a chance de ocupar espaços já construídos no interior do campus era remota, propus uma construção em arquitetura não convencional, baseada nas tecnologias em desenvolvimento no Laboratório de Investigação de Livre Desenho, que dispensava fundações e poderia ser considerada desmontável, em caráter experimental, sem a caracterização formal de “área construída”.

O desafio era grande. Além de inovador, o prédio tinha que ser suspenso e apoiado entre as demarcações das vagas, de modo a não reduzir o número de carros estacionados. O programa em si demandava área construída de 150m², sem considerar circulações e banheiros.

Apresentei alguns croquis do prédio, com estrutura em colmos de bambu arqueados, amarrados em feixes e vencendo vãos de 9 m, com estrutura do piso modulada, composta por grade de colmos de bambu. A vedação externa em mantas de fibrobarro aplicadas sobre tramas pantográficas de bambu, com impermeabilização superficial em resina poliuretânica vegetal com areia (figura 82).

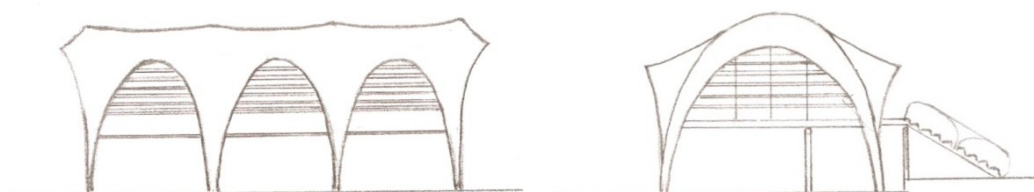


Figura 82: Croquis para ampliação proposta no campus da PUC-Rio, fachadas nordeste e noroeste, elaborado por Teixeira Filho (outubro, 2011).

Coincidentemente, na semana seguinte, estive em visita ao LILD o prof. Luís Eustáquio Moreira e tive a oportunidade de mostrar a ele e ao prof. Ripper os croquis. Ambos afirmaram não dispor de parâmetros, naquele momento, para o cálculo das arcadas de bambu amarradas em feixes com relação aos esforços estruturais solicitados, sendo temeroso prosseguir nesse projeto.

Em paralelo, entendeu-se mais adequada uma ocupação em pavimento térreo, mesmo abdicando de algumas vagas do estacionamento, o que simplificou consideravelmente as soluções de projeto. Mas a realidade se impunha: a verba disponível para a execução da obra não era suficiente nem para um sistema construtivo convencional, que dirá para um sistema experimental, em desenvolvimento. Independentemente disso, o prof. Ripper se interessou pelo projeto e estimulou a busca de soluções, para uma sala multiuso, que se adequassem ao sistema construtivo leve em desenvolvimento no LILD.

5.8.2. Proposta de projeto

O projeto surgiu de uma demanda por salas de aula na PUC e foi cedido um espaço no estacionamento para a sua implantação (figura 83).

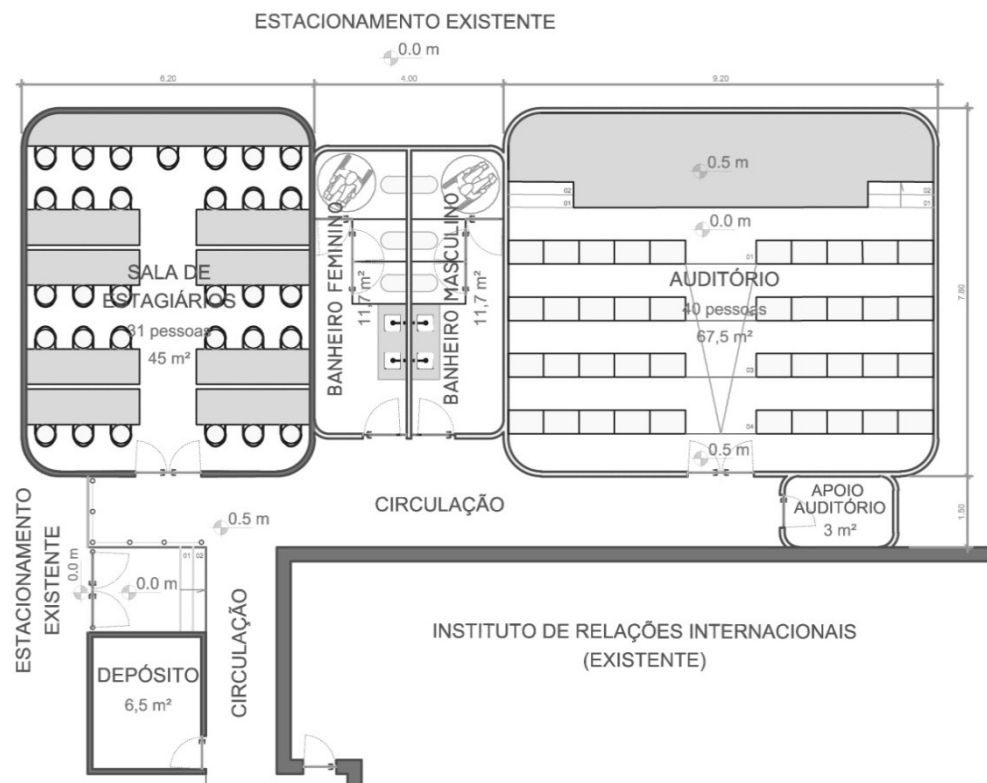


Figura 83: Estudo para ampliação do Instituto de Relações Internacionais da PUC-Rio, constando de auditório, sala de estagiários e sanitários.

Dado o programa, optamos por criar um módulo em cada extremidade, intercalado por banheiros, com parede hidráulica central, em placas de ardósia, de modo a não haver contato de instalações hidráulicas com o fibrobarro da vedação dos módulos laterais.

A sobrecobertura, que abriga os módulos laterais e os banheiros, responderá pela proteção térmica, criando um espaço intermediário ao redor da construção amplamente ventilado, com entrada inferior e saída zenital, por diferença de pressão. A ventilação natural dos módulos nas extremidades do prédio se dará pelo efeito chaminé, provocado, também, pelas entradas de ar baixas e saídas zenitais. A iluminação natural dos módulos será zenital, através dos lanternins.

Para se adequar ao sistema construtivo em desenvolvimento, dada a base retangular, os cantos foram arredondados com raio de um metro, para facilitar o desenvolvimento do fechamento lateral em forma abobadada (figuras 84 e 85).

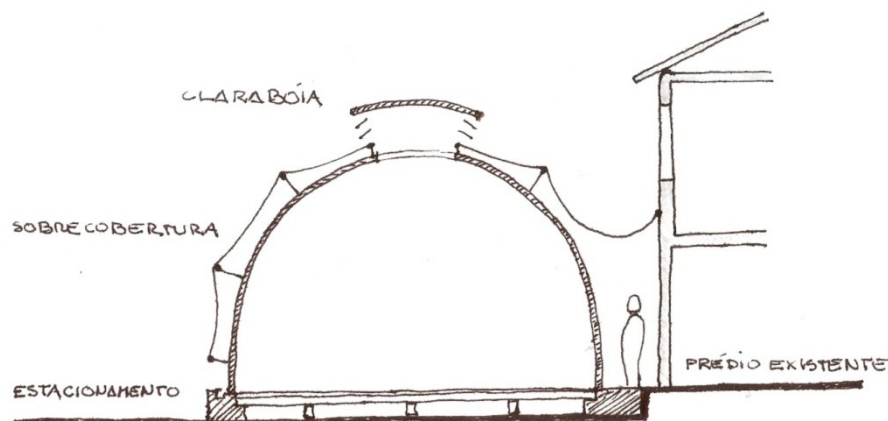


Figura 84: Corte transversal com esquema de iluminação e ventilação naturais.

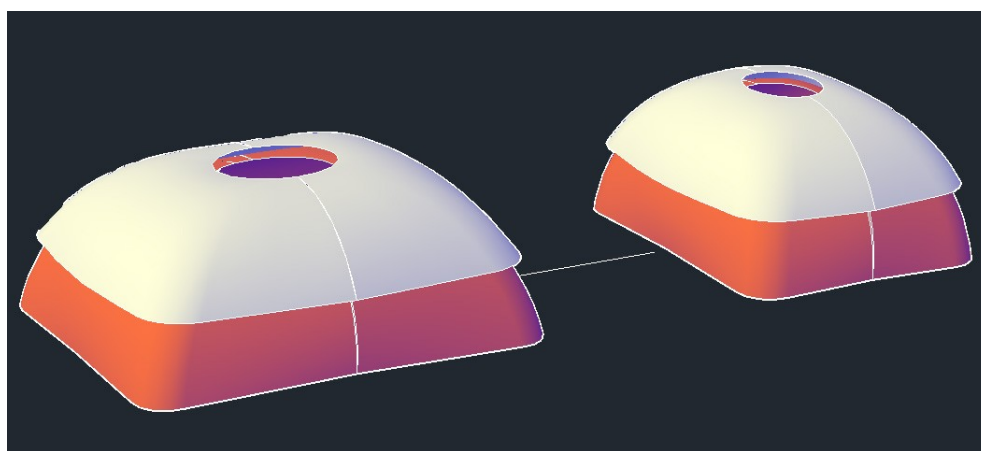


Figura 85: Modelagem dos módulos no programa *Sketchup*, gerada por Correia de Melo.

Aproveitando essa oportunidade, dadas as características do projeto, optou-se por realizar um protótipo que experimentasse a praticidade do momento técnico do Laboratório quanto às cascas de fibrobarro relacionadas com o bambu. No caso, a construção do módulo da sala dos estagiários que, devido às dimensões (7,70 x 6,00m), totalizando 43,05 m², é propícia a uma sala de aula ou ainda a uma sala multiuso, que denominamos de “sala bolha”.

5.8.3. Processo de desenvolvimento

O processo utilizado para a obtenção do formato de cascas, descrito por Correia de Melo, Ripper e Yamaki (2012), nos mostra como, no LILD, esse processo de obtenção das formas não parte da realidade particular de cada indivíduo envolvido na pesquisa, mas, na verdade, está voltado para a natureza que, em conjunto ou à revelia do pesquisador, faz as suas formas, baseada num

“*continuum* informacional desde milhões e milhões de anos, produto de infinitos processos, adaptações e evoluções (...). São formas biológicas e geológicas em contínua transformação, sujeitas ao desvelar do (...) homem que, ao parametrizar essas formações, consegue reproduzi-las dentro de suas tecnologias” (IBID., p. 3).

Para o Modelo de Catálogo de Composição de Serviços, ver apêndice 11, adotamos o método da observação direta das ações para apropriação do tempo de execução de cada tarefa e suas demandas. Além disso, entrevistamos os executores das tarefas após sua realização, com vistas a estimular a autoavaliação do desempenho e a reflexão sobre os procedimentos efetuados, em busca de aprimoramento. Nessa quantificação foram mensurados os materiais incorporados ao produto, incluindo suas perdas e sobras, em atividades desenvolvidas por pesquisadores e alunos do LILD, correlatas a este sistema construtivo, sendo muitas delas em suas primeiras tentativas de execução.

Design da forma

A manipulação de uma bolha de sabão resulta em variadas formas, com a característica de a bolha buscar o maior volume com a área superficial disponível, dentro das condições impostas (figura 86).

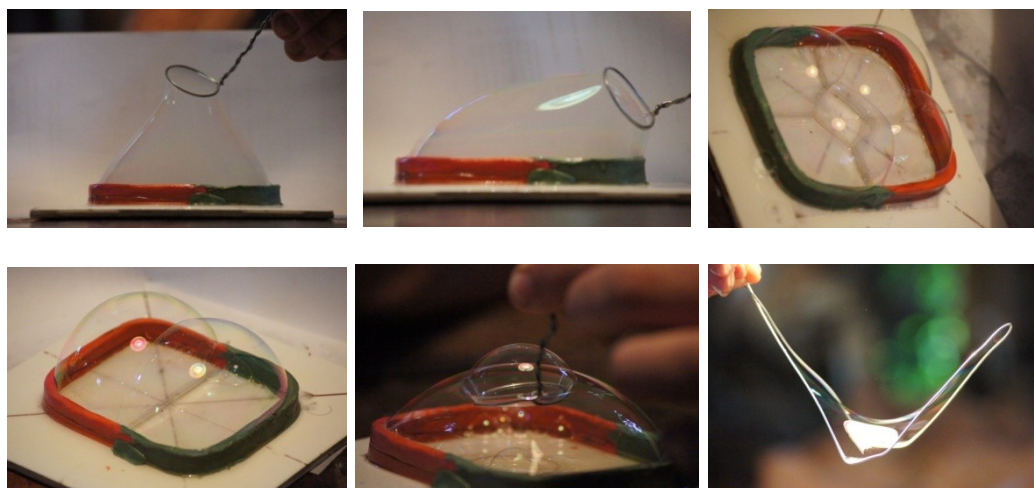


Figura 86: Imagens de várias bolhas manipuladas no LILD. Fotos de Correia de Melo, (2011).

A forma da casca foi obtida por inflagem controlada de uma bolha de sabão, seguindo parâmetros prescritos por Otto (1967), Ripper, Campos e Correia de Melo (2011). A base foi demarcada com massa de modelar sobre uma lâmina de vidro, na escala de 1:50, e em seguida derramou-se nela uma película de água misturada com detergente de cozinha. A bolha foi soprada com canudinho e,

posteriormente, para obter o contraste necessário ao registro fotográfico, enfumaçada em seu interior.

O momento de partida foi dado por nós: a base retangular com os cantos arredondados. Com o inflamento, a bolha foi tomando a forma mais conveniente à sua estrutura. Limitada por nós em sua altura, ela definiu as curvas de nível do seu desenvolvimento. A experiência, realizada no LILD em dia chuvoso, com elevada umidade relativa do ar, possibilitou a permanência das bolhas íntegras por maior espaço de tempo, facilitando a parametrização e o registro fotográfico (figura 87).

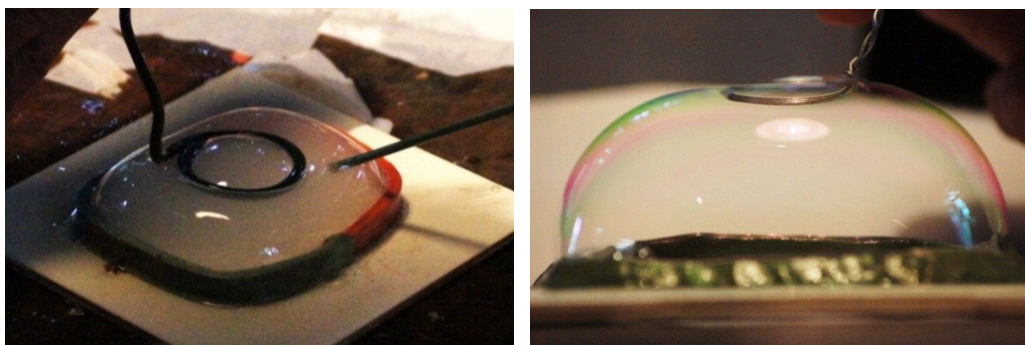


Figura 87: Deformação instrumentalizada da bolha de sabão, com os parâmetros desejados da base e da altura.

Parametrização da forma

A partir do registro fotográfico, a bolha escolhida teve a sua geometria descrita numericamente por software de computação gráfica (*Sketchup – plugin Soap Bubble – e AutoCAD*), resultando nas primeiras imagens tridimensionais. A superfície foi dividida graficamente por linhas que correspondiam a paralelos e meridianos indicando a locação básica da malha estrutural. Ângulos, comprimentos e distâncias foram auferidos por aproximação, o que possibilitou a mensuração das fitas para compor uma maquete (figura 88 e tabela 7) (CORREIA DE MELO, RIPPER, RIPPER e TEIXEIRA FILHO, 2012).

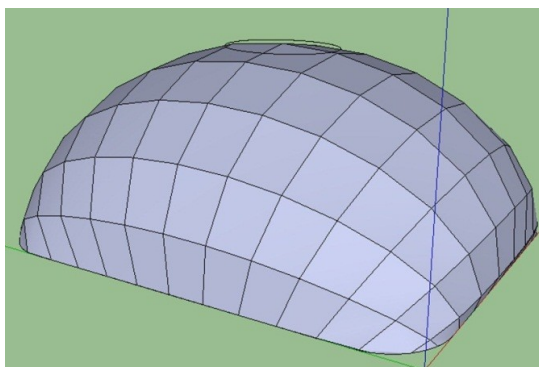


Figura 88: Programa *Plugin Soap Bubble* para *Sketchup*, gerado por Correia de Melo.

Tabela 7: Nomenclatura e medidas das 22 fitas estruturais, totalizando 200,41m.

Fita	Quantidade	Comprimento	Total (m)
A	1	11,83	11,83
B	2	11,54	23,08
C	2	10,69	21,38
D	2	9,45	18,90
E	2	8,07	16,14
1	1	10,37	10,37
2	2	10,22	20,44
3	2	9,77	19,54
4	2	9,02	18,04
5	2	7,98	15,96
6	2	6,81	13,62
7	2	5,78	11,56

Desenvolvimento do projeto

Como visto anteriormente, a forma geral da casca, que lembra a carapaça de um tatu, possui superfície contínua, de dupla curvatura, e foi obtida por meio de sucessivos experimentos em que se fez uso de técnicas artesanais apropriadas ao manejo de bolhas de sabão e técnicas de computação em que se utilizaram programas relacionados às leis de formação das bolhas.

A casca combina dois sistemas construtivos que utilizam técnicas e materiais diversos, já testados e descritos em várias publicações do LILD. Um dos sistemas é feito por uma trama ortogonal de fitas de bambu amarradas em seus cruzamentos e travadas nas diagonais. Os dimensionamentos necessários à estabilidade da estrutura, fixados empiricamente, são resultantes de experimentações de tentativa e erro.

O outro sistema é feito de mantas pré-fabricadas de fibrobarro, que recobrem inteiramente a trama de bambu, envolvendo-a e vedando-a, contribuindo para a sua consolidação. Por ser permeável ao vapor d'água e ter espessura delgada, essa casca requer o tratamento superficial com pasta cal, com dupla função: no interior, refletir a luz; no exterior, torná-la resistente à água. Na base da construção, pela face externa até um metro de altura, será aplicada resina poliuretânica vegetal como elemento impermeabilizante.

Outra estrutura de fitas de bambu será montada e integrada à estrutura de base, para reforçá-la e permitir o acoplamento da sobrecobertura, ainda em desenvolvimento.

Modelos reduzidos para a primeira montagem

Uma miniatura com fitinhas de bambu amarradas foi executada por Correia de Melo, em escala 1:25, para a descrição da forma dada pela bolha de sabão, reproduzindo as fitas estruturais e a primeira diagonal das fitas de travamento através da triangulação – pela subdivisão – da malha retangular estrutural, para observações gerais do conjugado concreto. A fixação das fitas na base se deu através da introdução de suas pontas em pequenas fendas abertas na superfície. Os pontos de partida das fitas receberam uma identificação alfanumérica que será utilizada na construção (figura 89).

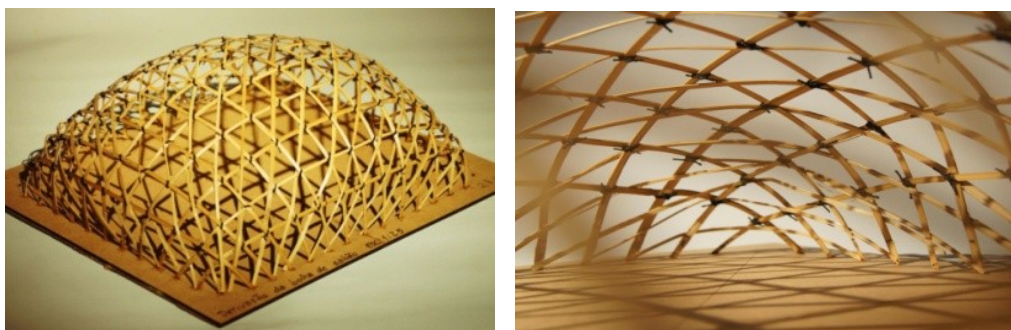


Figura 89: Miniatura em escala 1:25; perspectivada e vista interna. (CORREIA DE MELO, RIPPER, RIPPER e TEIXEIRA FILHO, 2012).

Outro modelo na escala 1:25 foi produzido por estagiários do LILD, com fitas de acetato em base de acrílico, procurando uma reprodução fidedigna do desenvolvimento das fitas na geometria da bolha. O resultado, porém, não se mostrou melhor do que a maquete com fitas de bambu. Este modelo – por ser impermeável – serviu como referência durante a primeira montagem ao ar livre da estrutura de fitas de bambu.

Processo de fabricação e montagem

A oportunidade para a primeira montagem da estrutura surgiu com o convite para participar da Fevuc². Na transposição do modelo reduzido para a escala real teriam que ser resolvidos pelo menos dois aspectos não mensuráveis na escala 1:25: a emenda das fitas estruturais, a amarração na base e partida dessas fitas. As

² FEVUC – Feira de Valores da Universidade Católica, de 22 a 29 de maio de 2012.

fitas estruturais de maior dimensão atingem um comprimento de 11,83m, e as fitas obtidas a partir do fatiamento do bambu disponível atingem no máximo 5m. A solução de emenda por amarração com transposição de pelo menos um metro nos pareceu melhor, resultando em três emendas nas fitas estruturais mais longas.

O bambu utilizado foi da espécie *Bambusa tuldooides*, proveniente da região de Piratininga, em Niterói, RJ. Inicialmente foram colhidos 35 colmos, cortados com 5m de comprimento para facilitar o transporte ao Laboratório. Os colmos tinham a base com o diâmetro variando de 3,5cm a 4 cm. Foram abertos em quatro fitas cada um, com faca radial, e estas, depois de limpas, apresentaram seção em torno de 3 x 1cm e comprimento útil de 3 a 5m. Portanto, em média, cada colmo aberto resultou em 16m de fitas.

Considerando que as fitas de travamento diagonal, que totalizavam 283,45m, também requeriam emendas e que as perdas de pontas não aproveitadas corresponderam a cerca de 20% do seu comprimento, foram colhidos e fitados 50 colmos para produzir um total de 800m de fitas, que resultaram em 484m úteis de fitas estruturais e de travamento.

Para facilitar a marcação dos cruzamentos das amarrações sobre as fitas, produzimos um mapa alfanumérico com as cotas de locação (apêndice 17). A base foi composta por colmos de bambu amarrados, formando o retângulo de 7,70 m x 6,00m, no qual a sala bolha é inscrita.

As fitas foram organizadas no local de montagem e amarradas nos cruzamentos. Observamos que, à medida que a malha se forma, a tendência é sair do plano de montagem, no caso o chão (figura 90).



Figura 90: Amarração da trama, percebendo-se a deformação pela junção dos cruzamentos.

Utilizamos o nó fiel em todas as amarrações: sendo 116 nós nas emendas, 102 nós das fitas estruturais à base e 191 nós nos cruzamentos da malha, no total

de 409 nós. As fitas em diagonal, de travamento, não receberam amarração, firmadas apenas pelo trançado na estrutura (figura 91). Considerando que a área superficial desta “sala bolha” é de 87,89 m², temos a média de 4,6 nós por m².



Figura 91: Estrutura erguida vendo-se as sobras de cordas em cada nó. No dia seguinte, cruzamento das fitas diagonais, sem amarração. Os gabaritos de altura – varas na vertical – ainda estão locados nos cruzamentos mais altos da malha.

A estrutura ficou no jardim da PUC por duas semanas, resistindo ao sol e à chuva sem apresentar maiores deformações, apenas o empeno, o abaulamento e a rachadura no sentido longitudinal de algumas fitas. Dali, com oito pessoas (duas em cada lateral) a transportamos até os pilotis do prédio próximo, onde efetuamos a desmontagem e a separação das fitas em bom estado, em apenas duas horas.

Concluimos que para a próxima montagem a base deveria ser refeita, com colmos mais grossos e com fendas abertas ao longo do seu dorso, nos locais de partida das fitas, para que as extremidades destas fitas se encaixem no interior do bambu, eliminando as amarrações à base. Os colmos seriam unidos por arcos, formando o contorno (figura 92). As fitas estruturais seriam mais refinadas para descrever com mais precisão a superfície da bolha. Para isso deveriam passar por um desengrosso.



Figura 92: Colmos de *mossô* sendo tratados pelo pesquisador Daniel Malaguti para formar a base. Arco de fitas de bambu, que compõe os cantos, fixado ao colmo com amarração em torniquete.

A remontagem da estrutura aos fundos do Armazém 4 do Cais do Porto, na Rio+20³, levou um dia inteiro, incluindo as amarrações para compor as fitas maiores e a marcação do gabarito dos cruzamentos em todas as fitas. Cerca de quatro pessoas revezaram-se durante um período de oito horas para concluir a montagem. A abertura da porta ficou para o dia seguinte (figuras 93 e 94). Observamos que a repetição das ações na remontagem agilizou o processo, inclusive na marcação dos cruzamentos das fitas.



Figura 93: Amarração para compor as fitas maiores e a estrutura já montada. (CORREIA DE MELO, RIPPER, RIPPER e TEIXEIRA FILHO, 2012).



Figura 94: Vista interna do canto onde será aberto o vão de entrada, observando o reforço em fitas de bambu numa das laterais. Estrutura já com o vão aberto.

Modelos reduzidos para a segunda montagem

Montamos outro modelo reduzido com a colaboração de estagiários, este na escala 1;6, com varetas de 2mm de diâmetro, retiradas de uma antiga cortina de bambu. O uso desta escala não convencional foi definido em função da maior vareta de que dispúnhamos, de modo a não existir emenda nas barras.

³ RIO+20 – Ministério da Ciência e Tecnologia: Fórum de Popularização da Ciência, de 12/06 a 24/06/12, no Armazém nº 4, Cais do Porto, em apoio ao International Network of Bamboo e Ratan (INBAR).

Com esse modelo objetivamos testar um sistema de forração, dependurado na estrutura, a fim de liberar espaço para a sobrecobertura, e testar o comportamento das varetas de bambu na forma da bolha.

Observou-se que nas varetas, mesmo sendo aparentemente uniformes, as regiões dos nós ofereciam resistência ao seu curvamento, não reproduzindo exatamente a forma desejada da bolha, provocando o desalinhamento das varetas da malha estrutural, como pode ser visto na figura 95.



Figura 95: Modelo escala 1:6, com base de 1,30 x 1,00m e altura de 54cm.

Quanto à forração interna com tecido, o seu resultado foi bom, devendo ser mais bem testada.

Outra maquete foi montada por Correia de Melo, coadjuvado pelos estagiários, na escala 1:12, com rede de cabos dependurada na estrutura com objetivo de estudar um sistema de aplicação das mantas de fibrobarro na forração. Foram recortados pedaços de papéis na dimensão da malha estrutural para serem colados à rede de cabos (figura 96).

O resultado mostrou-se viável, porém, para o manuseio, as mantas de fibrobarro devem ser do tamanho de meio módulo estrutural e com sobras de 10cm em cada lateral para cingir os cabos e fazer a emenda.



Figura 96: Maquete com peças de papel coladas que reproduzem mantas de fibrobarro compondo a forração interna.

Outro design em escala reduzida foi desenvolvido: o travamento da estrutura em *tensigrity*, como opção ao travamento diagonal utilizado na primeira montagem. Esta maquete foi executada por Yamaki e Correia de Melo, na escala

1:12, com a colaboração de estagiários. Nessa opção, os apoios para a forração interna – e para a sobrecobertura – são deslocados da malha estrutural de fitas de bambu para os eixos dos *tensigrits*.

O resultado estrutural do uso dos *tensigrits* proporcionou rigidez à maquete, indicando ser uma solução viável, porém, mais trabalhosa, devido ao beneficiamento, com aumento da quantidade e complexidade de amarrações e à inserção de uma haste de bambu em cada ponto de apoio. Por outro lado esses pontos de apoio suportariam a sobrecobertura e diminuiriam os vãos livres da malha, facilitando o fechamento (figura 97).

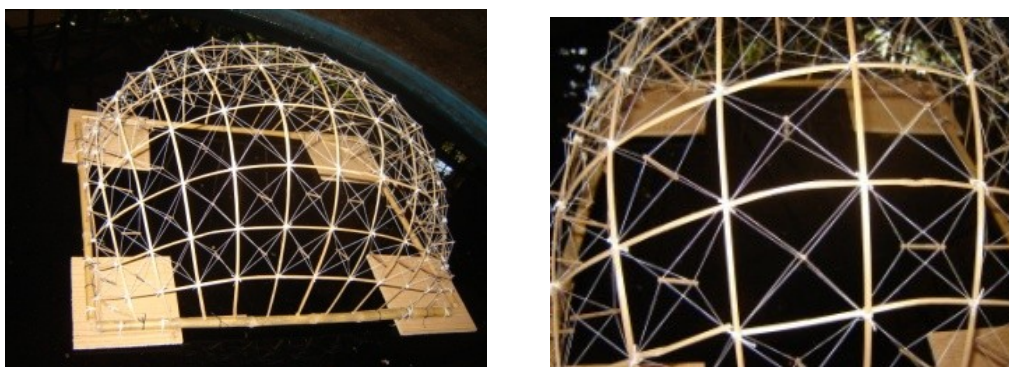


Figura 97: Maquete 1:12 mostrando as amarrações de travamento em *tensigrits*. (CORREIA DE MELO, RIPPER, RIPPER e TEIXEIRA FILHO, 2012).

Segunda montagem da estrutura

Novas fitas de bambu foram abertas a partir de colmos de *mossô* existentes no LILD, com faca radial de quatro lâminas. Depois de abertas, foram batidas nos nós com facão para planificá-las como uma *esterilha*. Passaram em seguida pelo desengrosso e ficaram, em média, com seis centímetros de largura e um centímetro de espessura (figura 98).



Figura 98: Fitas amarradas. Na imagem à esquerda temos a superposição de uma fita emendada. Na imagem à direita temos a amarração do cruzamento de fita diagonal e amarração complementar para a rede de cabos.

A estrutura foi montada inicialmente a céu aberto no campus da PUC-Rio para teste, onde permaneceu por duas semanas recebendo sol e chuva (figura 99). Algumas fitas empenaram, porém a maioria das fitas continuou íntegra.



Figura 99: Estrutura montada com fitas abertas em *esterilha* e com rede de cabos.

Desmontada a estrutura, as peças foram transportadas para os pilotis de um dos prédios para serem remontadas e também para, sob a proteção da laje, se testar a forração com papel reforçado com fios de *kevlar*⁴ (figuras 100 e 101).



Figura 100: Estrutura em montagem no pilotis, vendo-se na imagem à esquerda os gabaritos de altura ainda posicionados.



Figura 101: Colocação de gomos de papel para simulação de vedação.

⁴ Kevlar: nome comercial para uma fibra sintética de aramida muito resistente e leve.

Ainda não havíamos concluído a forração de papel quando se iniciou uma tempestade de verão, com ventos fortes varrendo os pilotis. A estrutura de bambu com vedação de papel foi arrastada de um lado para o outro, sacudida e molhada. O vento forte, canalizado pelos pilotis, exerceu pressões positivas e negativas na forração, que, mesmo sendo de papel reforçado com fios de *kevlin*, se rompeu. A estrutura em fitas de bambu foi molhada pela chuva de vento e, como consequência dos esforços sofridos pela forração, retorceu a parte superior em direção ao centro da base (figura 102).



Figura 102: Estrutura deformada pela ação da chuva e do vento.

A consequência da ação da chuva com vento sobre a estrutura recoberta com papel, onde as fitas molhadas se tornaram mais flexíveis, foi um “flap” por sucção interna resultante devido à igual permeabilidade das faces.

A partir desta experiência, decidiu-se que a próxima montagem da estrutura seria em feixes de fitas de bambu para auferir mais resistência e assim estudarmos uma estrutura de sobrecobertura que se integre à estrutura e a reforce, de modo que possa suportar a claraboia. Com esse intuito, volta-se ao modelo reduzido.

5.8.4. Modelo reduzido com carapaça externa

Após montagens e desmontagens da estrutura em escala real com fitas de bambu, hora intertravadas na diagonal por outras fitas, hora tensionadas por cabos, decidiu-se confeccionar um modelo reduzido utilizando o material em teste

para a sobrecobertura: um compósito de matriz polimérica vegetal mono-componente, reforçado por gaze industrial com carga de barro areia e gesso.

Problematização

- i) Aumento da resistência da estruturação às ações aerodinâmicas.
- ii) Criar sinergia no acoplamento entre a estrutura interna e a casca de sobre-cobertura da bolha.

Condições de funcionamento

- i) Verificar o comportamento do compósito em teste para a sobrecobertura, perante a abertura de vãos após a moldagem da maquete.
- ii) Permitir a iluminação zenital através da claraboia.
- iii) Permitir a ventilação natural no colchão entre a estrutura interna e a casca de sobrecobertura da bolha.
- iv) Permitir a ventilação natural no interior da “Sala Bolha” através dos vãos na forração interna.

Processo de desenvolvimento

Devido ao formato da “sala bolha” e a partir de sua modelagem eletrônica, foram confeccionados dois moldes de poliuretano expandido na escala 1:25, um reproduzindo a volumetria da estrutura interna e o outro, da carapaça externa, cortados num fresador CNC no Laboratório de Modelos, Protótipos e Maquetes do Departamento de Artes e Design. Estas formas são compostas por meias-formas para facilitar a desmoldagem (figuras 103 e 104).



Figura 103: Meias-formas da estrutura interna e da sobrecobertura, mostrando suas proporções, já forradas com filme de PVC. À direita, uma meia forma concluída.

Depois de laminado, o molde ficou sobre a bancada para a secagem e, no dia seguinte, foi processada a desforma e em seguida as rebarbas foram raspadas. Outro molde foi laminado para compor o par que compõe a forração interna, de cor escura, devido à utilização de barro na composição da carga mineral. Depois de seco, desformado e raspado nas bordas, os moldes foram ajustados e colados com aplicação da mesma argamassa utilizada no compósito, reforçada com gaze.

Devido à resistência e flexibilidade do compósito, resolveu-se que o molde da sobrecobertura fosse laminado de uma só feita, para evitar o procedimento de colagem. Para viabilizar o desmolde, seccionou-se uma meia forma e inseriu-se um septo entre as faces do corte, de modo a possibilitar o desmolde pela retirada em partes da forma. Na composição da carga para laminação da sobrecobertura não foi utilizado o barro, apenas a areia e o gesso, resultando numa coloração superficial mais clara.



Figura 104: Uma tentativa (abandonada) de moldar a carapaça com a gola da claraboia. Moldes unidos da estrutura e molde inteiro da sobrecobertura.

Após a confecção dos moldes foram recortados os vãos para a claraboia e os vãos de ventilação na estrutura de forração interna (figura 105) e confeccionada a gola de base para a claraboia na sobrecobertura.



Figura 105: Carapaça com claraboia. À direita, vãos de entrada e saída de ar no molde da forração interna.

Para garantir o distanciamento previsto entre a sobrecobertura e a forração interna foram aplicados espaçadores de tolete de bambu na face interna da carapaça e, depois de ajustados, cortou-se a parte inferior da carapaça de modo a ficar erguida, em escala, a 50 cm do piso. Assim fica garantido o ingresso do ar tanto no colchão entre a sobrecobertura e a forração interna, quanto através dos vãos para o interior da sala.

Por fim confeccionou-se a cobertura da claraboia em papel cartão, com seções elípticas, recoberta com a mistura de resina vegetal, areia, gesso e barro, utilizado no compósito. Esta cobertura ficou espaçada da estrutura por palitos de bambu, formando o vão da claraboia (figuras 106 e 107).



Figura 106: maquete montada



Figura 107: Detalhe da claraboia e vista aérea da maquete.

Observações diretas

Ficou comprovada a eficácia do compósito de matriz polimérica vegetal, reforçado por gaze industrial e com carga mineral, que apresentou bom resultado com relação tanto à flexibilidade e à resistência quanto ao corte de sua superfície.

Os vãos de ventilação da claraboia e da forração interna mostraram-se suficientes para garantir a ventilação natural (ver cálculos no apêndice 15).

Quanto ao colchão de ar, o espaçamento de 50 cm parece demasiado, podendo ser reduzido para facilitar o acoplamento entre a estrutura interna e a sobrecobertura.