

3. Materiais e Métodos

3.1- Primeiro Experimento – Casca de Fibrobarro sobre Molde de Areia (escala 1:10)

A curva catenária ponto de partida para o desenvolvimento da cúpula, foi escolhida por se tratar da forma que permitiria a construção da casca com as menores espessuras, além da facilidade de geração de seu desenho. Como visto anteriormente esta curva é obtida colocando-se uma corrente presa pelos seus extremos sem que sobre elas atuem outras forças.

Inicialmente foi descrita a curva utilizando uma corrente fina pregada pelas duas extremidades à uma placa de compensado, a curva escolhida para o experimento media 225 cm de base, por uma altura de 180 cm, medidas em escala 1/10 aproximadamente. As dimensões foram determinadas partindo da premissa da construção de um espaço mínimo que pudesse ser habitado. (Figura 28)

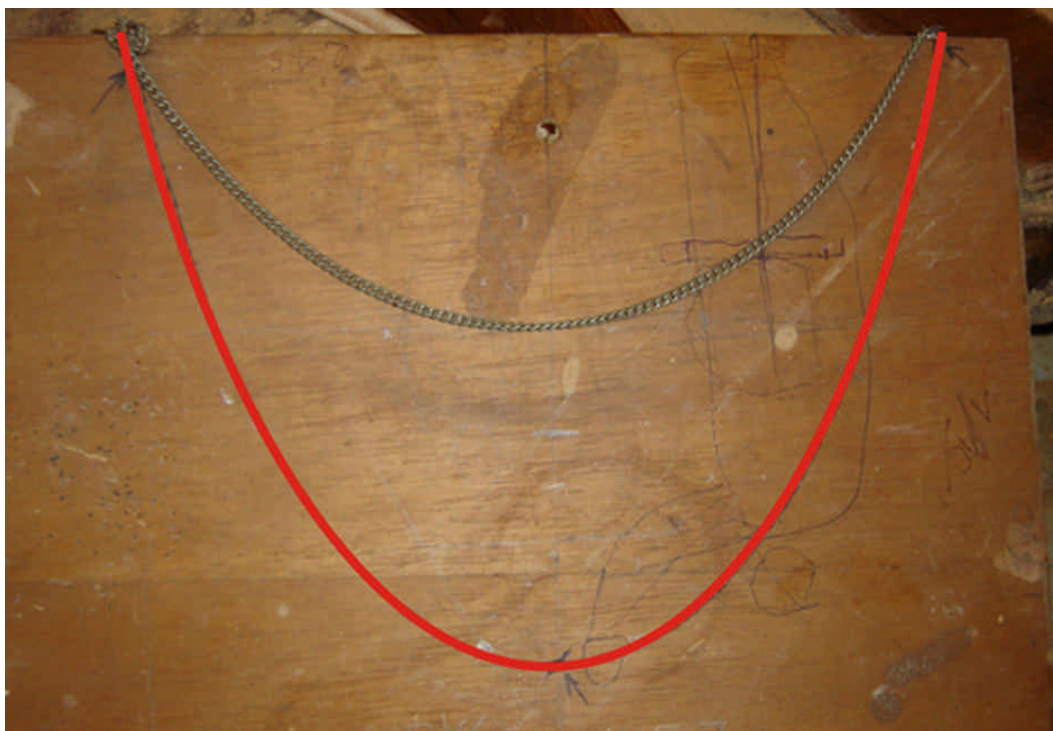


Figura 28: descrição da curva catenária escolhida (vermelho)

Um molde de poliestireno (esp. 2,0 mm) foi cortado utilizando a metade da curva catenária a partir do seu eixo vertical, este molde serviria como gabarito da curva mencionada anteriormente. Na primeira etapa do processo uma haste de madeira foi posicionada verticalmente, fixada a uma base de compensado. Sucessivas camadas de areia foram sendo depositadas na chapa de compensado, sempre utilizando-se da haste como centro do raio, e do molde de poliestireno como ferramenta para “tornear” a areia (Figura 29). Conforme as camadas de areia eram depositadas, as mesmas eram umedecidas com água, utilizando-se um borrifador manual e comprimida com as mãos para melhor compactação. O ato de borrifar foi de suma importância para garantir a umidade necessária visando a não desagregação dos grãos de areia.



Figura 29: processo de “torneamento” da areia

Na segunda etapa foi colocada uma camada de fibrobarro (barro hidratado + sisal) por sobre o molde de areia, Uma vez iniciado o processo de secagem do barro, quando a casca já apresentasse certa rigidez, pensávamos que bastaria levantar a base de compensado da superfície que a mesma encontrava-se apoiada e a areia poderia “escorrer”, como em uma ampulheta, pelos orifícios feitos anteriormente na chapa de compensado. Porém como a areia havia sido umedecida durante o processo de moldagem, a mesma encontrava-se muito agregada não permitindo, portanto, sua retirada pelos furos. Outro problema percebido devido a não retirada da areia do interior do experimento foi a demora da secagem do barro colocado diretamente sobre a areia úmida.

A solução adotada para a retirada da areia foi abrir um orifício na parte superior do modelo e introduzir uma vara de bambu com o entrenó vazado fazendo-o penetrar na areia em movimentos giratórios sobre seu próprio eixo, de forma que no processo de enterrar o bambu, a areia era naturalmente compactada

dentro deste, o que tornava possível retirar o bambu de dentro da cúpula com uma certa quantidade de areia no seu interior que por sua vez era facilmente retirada do lado de fora, bastando apenas bater com o bambu no chão. Este processo repetido inúmeras vezes possibilitou esvaziar toda a areia de dentro da casca. (Figura 30)



Figura 30: retirada da areia do modelo

O experimento resultou em uma casca de fibrobarro com boa resistência mecânica apesar da diminuta espessura (aprox. 2,0 mm). O modelo não apresentou rachaduras, muito comum em peças de barro trabalhadas com uma umidade tão elevada. Experimentos realizados anteriormente com fibrobarro no LILD nos indicavam que a quantidade de fibra no compósito podia ser aumentada a ponto da quantidade de barro utilizada ser apenas o necessário para impregnar as fibras. Ao contrário do compósito de barro e fibras utilizado na confecção de tijolos de adobe que tem uma quantidade mínima de fibras apenas para evitar as rachaduras, já que são solicitados somente a esforços de compressão; no caso deste experimento, a principal função das fibras seria, além de garantir a trabalhabilidade na construção da casca, ter a função estrutural resistindo aos esforços de tração após a secagem da casca em temperatura ambiente.

Partindo destas premissas e considerando o mesmo método construtivo do molde de areia que demonstrou ser eficaz, sentimos a necessidade da aplicação do experimento em escala real, onde pudesse ser mais bem observado o comportamento do material.

3.2. Segundo Experimento – Casca de Fibrobarro sobre Molde de Areia (escala 1:1)

A cúpula em escala real media 225 cm de base e 180 cm de altura. O procedimento para geração do molde deu-se tal qual no experimento realizado anteriormente, tendo como única diferença a utilização de terra crua ao invés de areia na confecção do molde que receberia a casca de fibrobarro. Um gabarito confeccionado em papelão girava em torno de um eixo vertical e dava forma ao molde (Figura 31). Depois de moldado este recebia uma camada final de massa de barro em estado mais plástico para garantir um melhor acabamento. O molde foi revestido externamente por uma camada de filme de PVC para facilitar a desmoldagem, visto que tanto o molde como a casca eram constituídos do mesmo material, evitando-se assim a colagem da casca no molde.



Figura 31: construção do molde e detalhe do acabamento final

Neste experimento foi utilizado o sisal disponível no mercado, comprado em fardos com fibras que mediam aproximadamente um metro. Como o sisal atua como reforço na matriz (barro) do compósito de fibrobarro e neste caso o compósito pressupunha a distribuição aleatória e homogênea das fibras, era necessário o desfibramento do fardo. O método empregado no desfibramento do fardo de sisal, tradicionalmente empregado nas técnicas de estuque, consistiu em colocar uma pequena quantidade da fibra na ponta de uma varinha de bambu e vibrá-la com rápidos movimentos cíclicos verticais transformando a matéria em uma pequena “nuvem” de sisal. (Figura 32)



Figura 32: desfibramento do sisal

A nuvem de sisal era, entretanto, muito dispersa, tornava-se necessária a organização das fibras em dimensões compatíveis a serem trabalhadas manualmente. Com um punhado de sisal retirado da nuvem foi moldada manualmente uma geometria de forma arredondada com aproximadamente trinta centímetros de diâmetro, a qual chamamos de “ninho”. Esses ninhos são a base do compósito que irão revestir o molde. (Figura 33)



Figura 33: processo de confecção dos ninhos

A terra de coloração vermelha que seria utilizada como matriz do compósito de fibrobarro, foi peneirada manualmente em peneira de malha de 2,5 mm. Posteriormente foi colocada umedecida em repouso, envolta por um material plástico, durante quatro dias para garantir a hidratação de todas as partículas do barro. Após esse período a terra foi amassada com os pés, acrescentando-se água até que a mistura estivesse com a consistência necessária para sua aplicação nos “ninhos” confeccionados anteriormente com o sisal desfibrado. (Figura 34)



Figura 34: processo de amassamento do barro

O próximo passo consistiu na transformação do ninho de sisal e da terra crua em compósito de fibrobarro. Os ninhos foram então dispostos em uma bancada revestida por material plástico a fim de evitar que após a colocação do barro, os mesmos ficassem grudados e sofressem algum dano durante o descolamento do compósito da superfície de trabalho. Uma porção de barro em estado pastoso era então colocada por sobre a superfície do “ninho” e espalhada cuidadosamente com a ponta dos dedos a fim de evitar sua deformação, o mesmo procedimento foi realizado no lado oposto da peça formando assim um compósito ao qual denominamos “pizza”. (Figura 35)



Figura 35: processo de transformação dos ninhos em pizzas

Para permitir que a massa de barro penetrasse por entre as fibras de sisal garantindo a homogeneidade do compósito, procedeu-se o amassamento do barro com a ponta dos dedos, acrescentando mais barro sempre que necessário, para garantir a homogeneidade do barro. O compósito apresentava boa consistência plástica, tamanho adequado para ser trabalhado manualmente e como principais características pode-se destacar a autoportância, a moldabilidade e a maleabilidade. (Figura 36)



Figura 36: pizzas de fibroso

Em seguida foi iniciado o processo de revestimento do molde em si, assentando-se as “pizzas” de fibrobarro diretamente sobre o molde de barro. No procedimento de colocação das “pizzas” no molde é fundamental que exista uma superposição de 5,0 cm entre as peças, a fim de assegurar a continuidade das fibras de sisal e melhorar a qualidade final de toda a casca. (Figura 37)



Figura 37: colocação das pizzas sobre o molde

Após o assentamento das “pizzas” de fibrobarro por sobre o molde, e como maneira de melhorar ainda mais a continuidade das fibras e a performance do compósito, foi acrescentada por sobre todo o molde uma manta de “nuvem” de fibra de sisal a fim de corrigir possíveis falhas de distribuição das fibras das “pizzas” durante o processo de confecção e colocação das mesmas no molde, garantindo desta forma a isotropia de toda a casca. Durante a aplicação da “nuvem” procedeu-se um movimento de compactação com as pontas dos dedos, esse movimento além de garantir a agregação do barro, permitiu o contato entre as fibras de sisal da camada das “pizzas” e da manta de “nuvem”. (Figura 38)



Figura 38: aplicação da manta de nuvem de sisal

Depois de finalizado o recobrimento de todo o molde com o compósito de fibrobarro, o experimento foi coberto com plástico durante sua secagem (aproximadamente 5 dias). Esse procedimento retardou a perda de água do compósito, evitando assim o aparecimento de fissuras, muito comuns em peças que sofrem processo de desidratação acelerada.

Após a secagem da casca, que como veremos adiante, não se deu de forma total, quando a mesma já apresentava resistência estrutural, foi aplicada externamente uma pintura de resina de mamona como impermeabilizante, a fim de melhorar sua qualidade estrutural. (Figura 39)



Figura 39: aplicação da resina de mamona

Uma abertura com diâmetro aproximado de sessenta centímetros foi executada para que a terra usada no molde pudesse ser retirada do interior da casca. O corte foi efetuado com serra de corte tipo “makita”. Com a retirada da tampa pudemos constatar que a mesma apresentava uma espessura de aproximadamente 10 mm. (Figura 40 e 41)



Figura 40: abertura de tampa para remoção da terra

Apesar de já sabermos anteriormente da dificuldade na utilização da terra, tanto na execução do molde, como na retirada da terra do interior do mesmo, sua utilização foi de grande valia e esta foi a melhor maneira que nós encontramos num primeiro momento, para viabilizar a execução do experimento e comprovar as propriedades do compósito que estava sendo estudado na construção de cascas. Faltava-nos agora descobrir um processo que viabilizasse a construção das cascas.



Figura 41: forma final do experimento

A realização do experimento coincidiu com um fator externo que prejudicou o bom andamento do mesmo. O galpão do LILD, local onde se realizava o experimento, precisou ser demolido para atender a uma demanda da universidade e o experimento acabou ficando exposto à intempéries. Como o experimento não foi concebido para ser construído ao tempo, não foi tomado anteriormente nenhum cuidado em relação a fatores externos, como exposição direta à chuva ou umidade proveniente do piso. (Figura 42)



Figura 42: umidade na base do modelo e colocação de cunhas para evitar o contato direto com o chão

Uma estrutura provisória, aproveitada de parte da demolição do galpão, foi colocada para possibilitar a proteção à chuva. Mesmo assim, o principal problema não conseguiu ser evitado, o caimento do piso coincidia com o local onde foi construído o experimento, e toda a água proveniente da chuva acabava empoçando na base da casca. Como forma de atenuar esse fato, algumas cunhas de madeira foram colocadas ao redor da base a fim de garantir que a mesma não encostasse no chão, mas como a umidade elevada já comprometera estruturalmente a base do experimento, visto que o barro da borda da casca ainda não havia secado completamente, a casca sofreu durante a colocação das cunhas suas primeiras avarias.

A necessidade de remoção da casca ainda úmida para o “novo” Galpão resultou em novas deformações ainda mais acentuadas pelo fato do transporte ter sido realizado de maneira precária. (Figura 43)



Figura 43: danos sofridos pela casca durante a operação de transporte

Em seu novo endereço a casca foi suspensa por um sistema de roldanas para a realização dos reparos necessários para sua recuperação, reparos estes executados com o mesmo compósito utilizado na construção da casca. O anel que foi utilizado para içamento da casca, também serviu como apoio para garantir a correção da curvatura na parte superior da casca, na parte inferior foram utilizadas peças de madeira que apoiadas nas paredes da casca reconfiguravam sua forma original. Nervuras de reforço foram criadas para garantir a manutenção da geometria e o enrijecimento da casca, estas foram dispostas obliquamente em relação à base e colocadas nos dois sentidos, visando a formação de uma espécie de malha que garantisse sua continuidade.

A única diferença observada em relação ao compósito utilizado, deu-se na distribuição das fibras de sisal, ao invés da utilização de ninhos como na construção, no reparo foram utilizados feixes de sisal, visto que esta distribuição de fibras seria mais compatível com os esforços aos quais a estrutura seria solicitada. (Figura 44)



Figura 44: cúpula antes e depois do reforço com nervuras de fibrobarro

É importante ressaltar que um dos motivos que levaram a decisão de reparar a casca deu-se pelo fato da observação de um outro experimento realizado anteriormente. Este experimento ficou exposto ao tempo por um período de aproximadamente seis meses e nos mostrou que a casca, embora tenha apresentado alguma deformação devido à exposição à umidade, não mostrou danos significativos em relação à integridade do material compósito utilizado e o

problema apresentado foi semelhante ao observado na casca exposta somente à umidade proveniente do piso. (Figura 45)



Figura 45: casca de fibrobarro exposta ao tempo por um período de 6 meses

Os experimentos supracitados nos permitiram chegar a algumas conclusões que orientaram o redirecionamento da pesquisa. Como qualidades da casca de fibrobarro, pudemos destacar que além das qualidades intrínsecas ao composto, a escolha da curva catenária como geradora da forma, como visto na revisão bibliográfica, foi acertada, porque permitiu a construção de uma casca autoportante com uma espessura reduzida, tornando possível sua realização com pequeno gasto energético, tanto em material como em mão-de-obra, visto que para a construção do objeto foram necessários somente noventa quilos de barro para um volume construído relativamente grande.

O método utilizado na construção do molde, entretanto, mostrava-se inviável para a construção de modelos em escala real devido ao grande volume de material necessário e energia gastos em sua execução. Embora já soubéssemos desse fato ao iniciar a pesquisa, essa foi a maneira encontrada para viabilizar, num primeiro momento, a realização dos testes necessários para avaliar o processo de construção e confirmar as qualidades da casca de fibrobarro. A pesquisa deveria focar a partir de então, a construção de uma fôrma que otimizasse o processo de construção da casca.

Como teríamos que rever o processo de desenvolvimento do experimento, optamos por alterar as dimensões e proporções da cúpula, para permitir que uma pessoa pudesse ficar em pé em seu interior. Com este intuito deu-se início uma

série de novos experimentos voltados para a pesquisa de novos métodos de construção do molde da cúpula, já que a casca em fibrobarro da maneira que foi executada mostrou-se viável.

3.3. Terceiro Experimento – Modelo em Malha de Correntes Metálicas (escala 1:10)

Aqui começa a sistematização da construção do novo objeto, redefinido em tamanho e proporção. Embora também partindo de uma catenária para sua geração, suas dimensões foram alteradas para atender a necessidade de aumento de sua altura e diâmetro da base.

Partindo de correntes e elos metálicos, foi construída uma malha metálica quadrada com dimensões de 45 x 45 cm (Figura 46). O modelo em escala reduzida de malha metálica basicamente permite a visualização da forma nas três dimensões e o entendimento das relações entre largura e altura.



Figura 46: malha metálica

O experimento consistiu no posicionamento da malha metálica por sobre uma placa de mdf com um orifício no meio com o diâmetro da base da cúpula projetada, em escala. Este experimento é utilizado para definir a altura e proporção da cúpula. Para tal, deixa-se a malha metálica “escorrer” pelo orifício utilizando-se de seus vértices para tensionar ou afrouxar a malha, de forma que a mesma adquira a curvatura desejada, gerando a forma da cúpula de cabeça para baixo. (Figura 47)

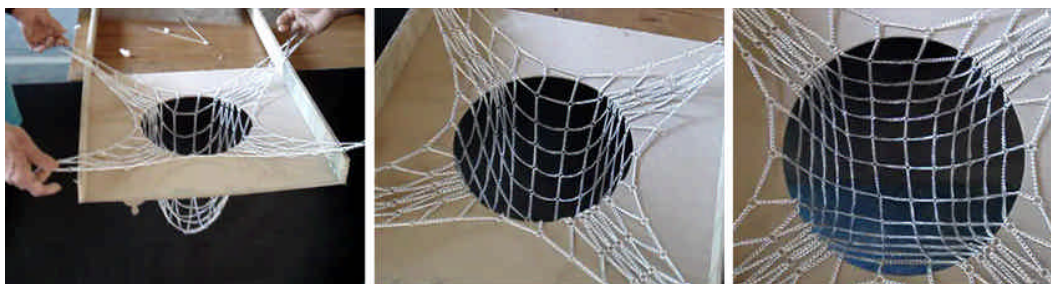


Figura 47: processo de verificação da forma

Não sendo um modelo estático, o dispositivo da malha metálica pode ser facilmente manipulado pelos quatro cantos da malha quadrada, o ato de manipulação da forma torna-se um exercício muito simples e lúdico. A facilidade de manipulação permite a visualização de um número indefinido de variáveis em um período de tempo reduzido. (Figura 48)

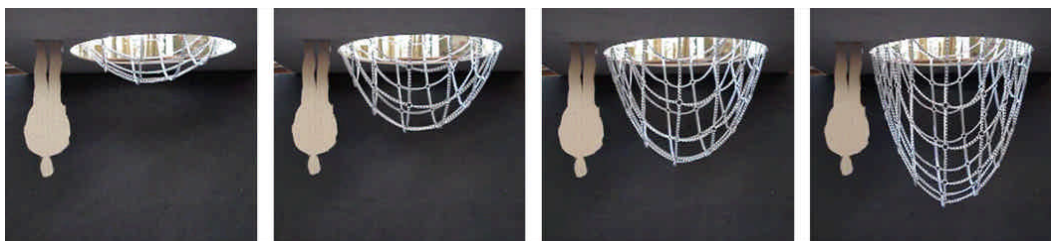


Figura 48: processo de verificação da forma

Depois de analisar algumas proporções geradas pela malha, chegamos a conclusão de que as dimensões de 2,5 metros de base por 2,0 metros de altura geravam a proporção ideal para o novo experimento.

3.4. Quarto Experimento – Modelo em Fôrma de Compensado (escala 1:1)

A idéia desse experimento foi a utilização de uma fôrma em compensado de madeira para a construção das cascas e que possibilitasse a retirada das peças do molde posteriormente à secagem do barro. Neste caso o ideal era que o molde fosse composto de peças com tamanho reduzido que encaixadas umas às outras formassem o molde completo, gerando a possibilidade de desmontagem e retirada das peças do interior da cúpula através da abertura na casca que serviria como acesso.

Pela primeira vez neste experimento, foi utilizado o computador (software Auto-Cad) como ferramenta para o desenho das peças do sistema. Os encaixes das peças, a otimização dos cortes na chapa de compensado e a marcação das furações nas peças foram desenhadas no computador e impressas em escala natural em papel sulfite. Para montagem do sistema, as chapas de compensado de 10mm eram fixadas umas as outras por pregos, o papel foi fixado com cola branca na superfície da chapa e recortado com serra tico-tico. Parafusos passantes com porca tipo borboleta foram utilizados para a fixação das peças. (Figura 49)



Figura 49: peças de compensado e processo de montagem das mesmas

Depois de executadas as peças das fôrmas, seu processo de montagem era relativamente simples e rápido, sendo necessário somente uma pessoa para a execução do serviço. Por outro lado, o processo de execução das peças constituintes das fôrmas requeria um grau maior de elaboração e necessitava de maquinário apropriado (serra tico-tico, furadeira, computador, impressora), além de despendar tanto tempo quanto o segundo experimento. Depois de executada a forma em compensado, outro problema detectado foi a grande dimensão dos vãos que compunham o sistema: o distanciamento entre as peças verticais e horizontais da fôrma era muito maior que o tamanho das “pizzas” de fibrobarro que tinham aproximadamente 30 cm de diâmetro. Desta forma a fôrma de compensado teria que ser adaptada com novas peças intermediárias para receber as “pizzas”, diminuindo o tamanho dos vãos e por conseguinte, gerando um gasto extra de tempo e material.

Apesar de todos estes fatores, a utilização da forma em compensado se justificaria no caso de construção seriada de cúpulas idênticas, pois o tempo, técnica, material e energia despendidos na construção de um único molde seria diluído entre todas as unidades construídas. Como a demanda poderia não

requerer a construção de várias unidades, a execução do molde em compensado não se justificava, mesmo para a construção de poucas unidades. Além disso, esse processo não solucionava o problema de resistência pontual da casca, que só seria conseguido pelo aumento da espessura da mesma, fato que aumentaria o consumo de material e mão-de-obra ou pela colocação de nervuras de reforço.

3.5. Quinto Experimento – Modelo Cônico Pantográfico (escala 1:10)

Neste experimento tem início a primeira aproximação com a idéia da construção de fôrmas/estruturas, ou seja, fôrmas que além de garantir a forma do objeto também desempenhassem a função estrutural, sendo estas incorporadas ao conjunto final do objeto. Era importante encontrar uma solução em que a fôrma fosse leve, apresentasse um gasto mínimo de material e mão-de-obra, e não necessitasse de ferramentas muito elaboradas na sua execução.

Por apresentar essas características, as estruturas pantográficas de bambu que por sua vez já eram objeto de pesquisa no LILD (Figura 50), poderiam ser utilizadas como uma alternativa, com a vantagem de, por serem retráteis, poderem ser trabalhadas em espaços reduzidos e serem facilmente transportadas. O desafio que se apresentava era adaptar as pantográficas de bambu desenvolvidas no LILD, normalmente bidimensionais, em estruturas que pudessem tomar a forma tridimensional da cúpula catenária, objeto do nosso experimento.



Figura 50: modelo tridimensional de pantográfica e “Barraca” PUC Rio

Inicialmente começamos pela planificação de um cone pantográfico, alguns desenhos foram gerados para servir de base na elaboração de modelos em escala

1/10. Como procedimento usual no LILD, demos preferência ao uso nos modelos processuais dos mesmos materiais que são utilizados nos objetos em escala real, visando obter com o uso desses materiais, pistas que nos auxiliem no processo evolutivo. Para a execução do modelo, inicialmente foram confeccionadas fitas de bambu que foram amarradas entre si, formando uma trama pantográfica cônica. Embora as fitas apresentassem um dimensionamento compatível com a escala do modelo, não respondiam adequadamente às necessidades de resistência, visto que as mesmas não se deformavam o suficiente para adquirir a forma desejada. A dificuldade na amarração das fitas de bambu com nós que permitissem a articulação entre as peças gerou pequenos erros na execução do modelo, que inviabilizou o bom funcionamento do dispositivo. Apesar de termos um modelo teoricamente tridimensional, na prática sua espacialização não se concretizou. (Figura 51)

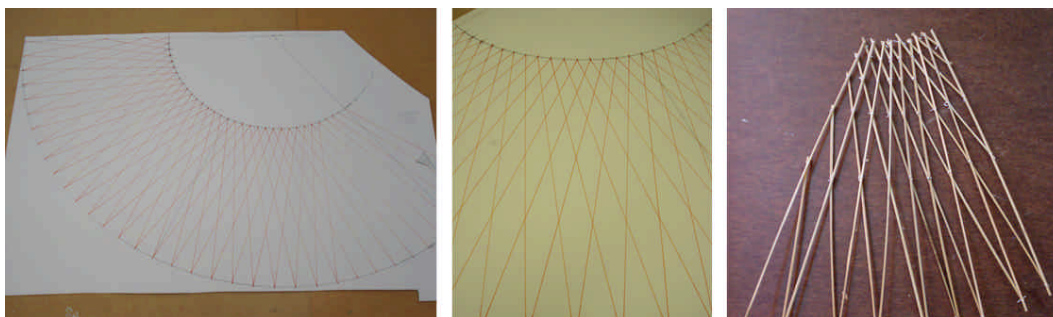


Figura 51: desenho de referência para o modelo e primeira pantográfica cônica

3.6. Sexto Experimento – Modelo Cônico Pantográfico sobre molde de Gesso (escala 1:10)

Concluímos que havia a necessidade de trabalharmos com um modelo tridimensional sólido, porque a estrutura pantográfica, solta no espaço, não permitia que sua geometria ganhasse a forma adequada. O primeiro passo desse experimento foi a execução de um modelo em gesso em escala 1/10. Essa escala foi definida em função do novo processo adotado. Um dos fatos mais interessantes nesse estudo foi o resgate de “velhos” processos de manipulação de materiais outrora esquecidos, como o uso do torno de cerâmica, a argila e o gesso. Estes materiais, devido a sua plasticidade, são os mais indicados para trabalhar em superfícies geradas a partir de movimentos de revolução, neste caso uma

superfície de dupla curvatura. O “velho” torno de cerâmica já aposentado no Laboratório de Volumes do Departamento de Artes e Design ganhou uma vida nova nas dependências do LILD. Similar ao processo desenvolvido no modelo em areia, foi recortado uma placa de poliestireno com a metade da curva catenária a partir de seu eixo vertical. Esta placa foi fixada em uma bancada ao lado do torno para garantir seu posicionamento em relação ao eixo do torno, e por conseguinte, ao eixo de revolução do molde. (Figura 52)



Figura 52: processo de trabalho no torno de cerâmica

Sucessivas camadas de barro previamente umedecido foram depositadas na base do torno, com movimentos manuais para gira-lo, assim o barro foi tomando a forma desejada e esses movimentos tornavam-se mais freqüentes a medida que a peça se aproximava de seu acabamento final. Quando a peça já apresentava uma geometria satisfatória foi colocada uma última camada de barro mais plástica que as demais, para conferir melhor acabamento ao modelo. Como não foi possível a colocação do gesso para a confecção da fôrma por sobre o modelo de barro no mesmo dia, o molde foi coberto por uma sacola plástica, a fim de evitar a deformação com o processo de desidratação.

Com a peça acabada, o próximo passo foi a confecção da fôrma em gesso utilizando a peça torneada como molde. O procedimento para colocação do gesso de estuque é simples e rápida, devido à sua velocidade de endurecimento. Primeiramente colocou-se um pedaço de tecido de juta na massa de gesso previamente misturada, em seguida esse tecido foi aberto e colocado por sobre a superfície do modelo. Com o auxílio das mãos, o tecido foi alisado, a fim de evitar o aparecimento de dobras que afetariam a qualidade da fôrma. A colocação do tecido de juta fez-se necessário para conferir resistência mecânica à fôrma.

Uma vez seco o molde de gesso iniciou-se a aplicação do desmoldante, seu uso fez-se necessário pelo fato da peça a ser copiada também ser de gesso. Neste caso foi utilizada uma mistura de sabão de coco com água e uma pequena quantidade de barro foi acrescentada, servindo como corante. O uso do corante foi necessário para apontar possíveis falhas na aplicação do desmoldante. O procedimento para a colocação do gesso internamente foi realizado como na colocação de gesso sobre a superfície do barro já descrito anteriormente. (Figura 53)



Figura 53: modelo em barro, fôrma em gesso (negativo) e modelo em gesso (positivo).

O que interessava neste experimento era investigar o desenho da trama pantográfica tridimensional. A grande vantagem de se trabalhar com um modelo físico é o fato de se visualizar muito melhor a espacialidade do objeto.

A forma em gesso serviu apenas como suporte para as fitas de bambu, que foram trabalhadas diretamente sobre o modelo em gesso, utilizando cola para a união dos cruzamentos, ao invés dos nós articulados (Figura 54). Concluimos que era possível executar uma estrutura pantográfica que se deformasse e adquirisse a forma da cúpula catenária. Entretanto era primordial que as dimensões de todos os segmentos da peça fossem exatas, o que só seria possível com o aumento significativo da escala do modelo ou com a utilização do computador como ferramenta de desenho.

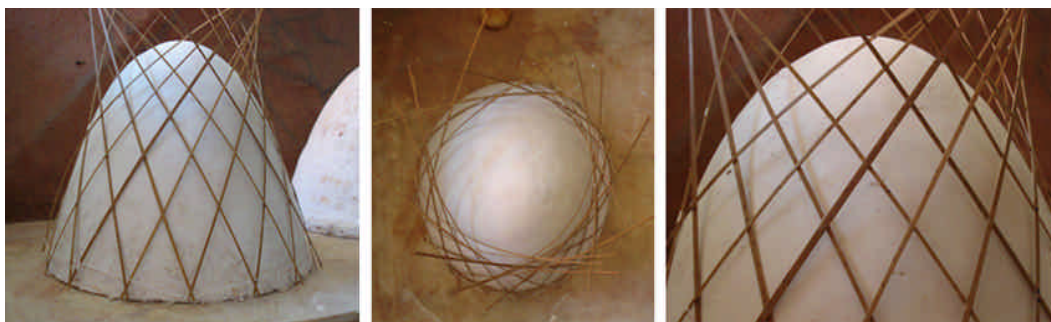


Figura 54: estudo da estrutura pantográfica sobre modelo em gesso

3.7. Sétimo Experimento – Modelo Pantográfico em Papel (escala 1:5)

Este experimento inaugurou nossa aproximação com as ferramentas virtuais para a geração da forma. O software Rhinoceros foi utilizado na geração da geometria do objeto em estudo. Partindo de algumas premissas desenvolvidas principalmente no estudo com o modelo em gesso, subdividimos o sólido em duas partes, uma inferior que tinha sua geometria mais próxima de um tronco cônico e uma superior que tinha uma geometria tendendo a uma forma esférica. Essa subdivisão foi crucial para a simplificação dos desenhos feitos previamente para o entendimento da pantográfica. A base do desenho foi formada por dois hiperbolóides de revolução que foram gerados em sentidos opostos. As linhas desses hiperbolóides de revolução foram então projetadas sobre a superfície do sólido e depois esses segmentos curvos foram prolongados na direção do topo da superfície que delimitava o sólido superior. Com isso pudemos comprovar que a geometria era gerada por parábolas inclinadas e descentradas em relação a um eixo vertical imaginário (Figura 55).

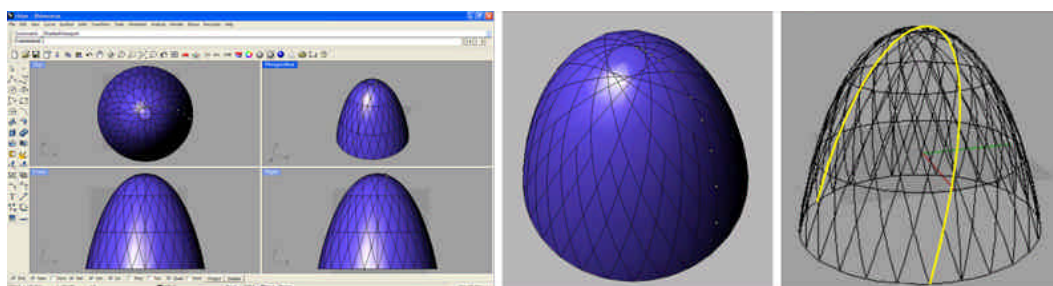


Figura 55: estudo no software Rhinoceros - 28 divisões - e a parábola geratriz da forma

Constatou-se, portanto, que só eram necessárias peças de uma mesma dimensão para a execução de toda a pantográfica, fato que facilitaria em muito o

planejamento e sua execução. Algumas outras possibilidades de frequência das peças e inclinações foram testadas, mas não apresentavam geometrias satisfatórias para seu desenvolvimento. Ora apresentavam um aumento muito grande do orifício superior devido a maior inclinação ou aumento da frequência, ora seu desenho estrutural se apresentava inadequado pelo fato de apresentar losangos muito longilíneos em sua base quando da diminuição dos ângulos de inclinação dos hiperbolóides. Como a idéia era que a forma também tivesse função estrutural, um bom arranjo das peças do sistema era fundamental para garantir que a pantográfica se comportasse adequadamente.

Um fato muito importante a ser destacado é que o desenho da estrutura não nasceu no computador, sua utilização deu-se pelo fato desta ferramenta possuir um grau de aferição perfeito, não podendo ser alcançado de maneira simples com modelos muito reduzidos. Quando da sua elaboração, todo o entendimento da forma e o partido adotado para a estrutura pantográfica já estava lançado, a grande vantagem foi a confirmação de algumas suposições e a possibilidade de fazer rearranjos de uma forma muito rápida.

O passo seguinte foi a definição das medidas dos segmentos desta curva, esses segmentos foram definidos pelo cruzamento das peças subseqüentes. O tamanho desses segmentos serviu de base para o desenho da peça que foi cortada por uma plotadora laser em papel Kraft 180 gr.

A escolha de um papel tão fino para a execução do modelo deu-se pelo fato deste material poder indicar como essas peças se comportariam durante a montagem da estrutura do modelo no espaço. As fitas de papel foram dispostas de forma inclinada em relação a uma base imaginária, mas paralelas entre si, em seguida colocou-se a segunda camada em sentido oposto à primeira. Para a união das peças foi utilizado um rebite confeccionado por um fio de nylon com as extremidades queimadas. As peças das extremidades não foram aparadas para quando se realizasse o fechamento da estrutura pantográfica, estas pudessem ser unidas garantindo assim que todas as peças da estrutura tivessem o mesmo comprimento e não aparecessem pontos de fechamento, locais onde a estrutura poderia estar mais fragilizada. (Figura 56)

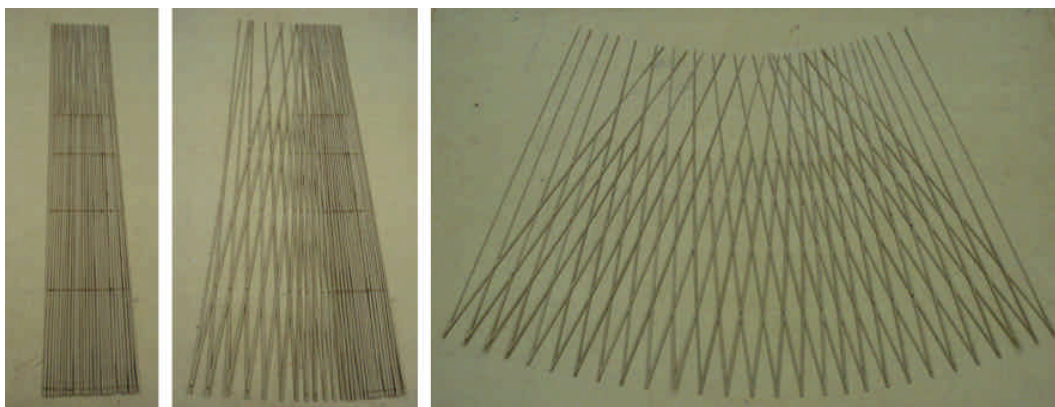


Figura 56: modelo da estrutura pantográfica em papel

Para a montagem da estrutura no espaço foi utilizado um suporte temporário no qual a estrutura pantográfica ficava apoiada durante a fase inicial de montagem. Na base confeccionada em OSB foram executados pequenos orifícios onde os 28 vértices que formavam a base da estrutura, pudessem ser equidistantemente dispostos. Depois que as extremidades da estrutura pantográfica foram rebitadas, o suporte foi retirado e a mesma já apresentava alguma qualidade de autoportância. (Figura 57)

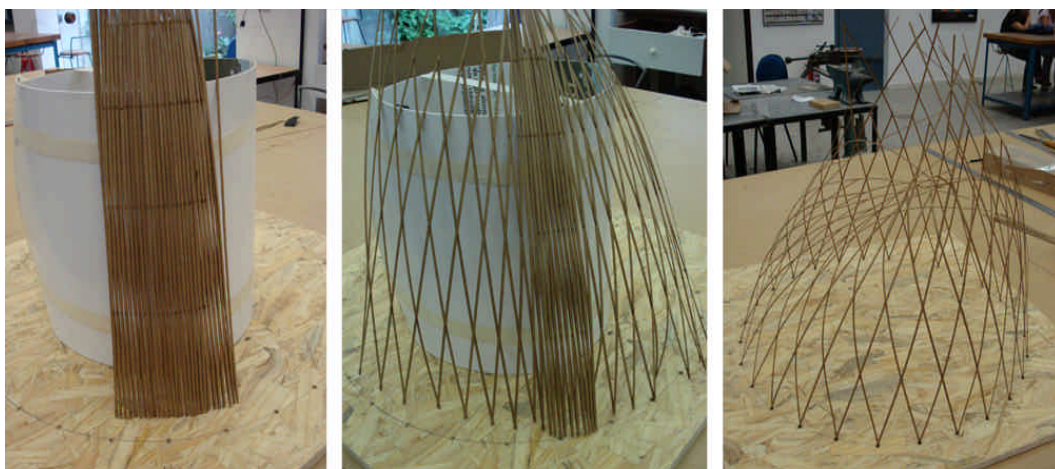


Figura 57: processo de montagem da estrutura pantográfica

Conforme os pontos de amarração foram sendo fixados pelos rebites de nylon, o objeto ganhava forma e resistência, comprovando que este processo poderia ser reproduzido em escala real.

Como se tratava de uma forma cônica a frequência inicialmente usada (28 partes), mostrou-se inadequada para a parte superior da estrutura, devido ao fato

que na parte superior o diâmetro do círculo de construção do hiperbolóide foi reduzido quase pela metade. A solução encontrada foi a mudança de frequência das peças que compunham o sistema na parte superior da estrutura, diminuindo-se pela metade o número de peças, para isso as peças inteiras eram intercaladas com peças de menor tamanho, reduzindo com isso a frequência na parte superior da estrutura. (Figura 58)

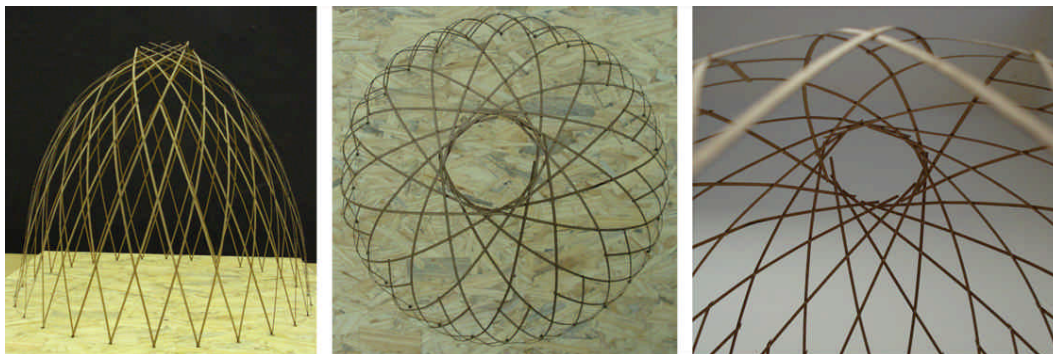


Figura 58: vista frontal, vista superior e detalhe do acabamento superior.

Com o modelo semi-pronto pudemos iniciar algumas observações de como a estrutura se comportaria face a alguns esforços e as perturbações geradas mostraram que a estrutura poderia sofrer deformações no caso de aplicação de esforços verticais. (Figura 59)

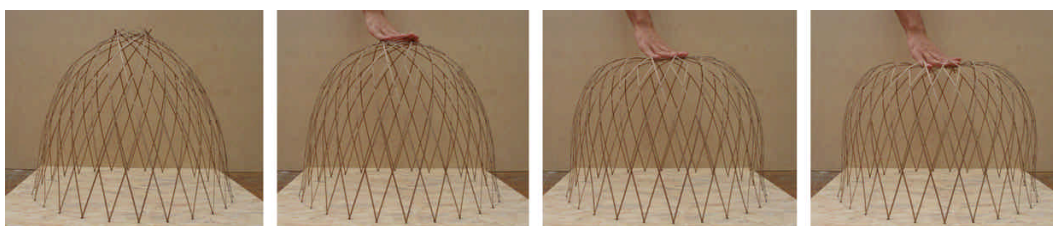


Figura 59: deformação do modelo mostrando a necessidade de colocação dos anéis de compressão

Isto não se tornaria um problema no caso da construção do modelo em escala real. Já era previsto a colocação de anéis de compressão nos cruzamentos das fitas, que além de auxiliarem estruturalmente a manutenção da forma, também teriam a função de diminuir o tamanho dos vãos entre as peças do sistema, auxiliando assim na redução dos “panos” que futuramente seriam fechados pelo fibrobarro.

3.8. Oitavo Experimento – Modelo de cúpula catenária em fibrobarro com fôrma-estrutura de trama pantográfica em bambu (escala 1:1)

Com um método previamente desenvolvido iniciamos a construção do modelo em escala real que tinha medida de base de 250 cm por uma altura de 200 cm. Para a confecção das fitas foi escolhido o bambu da espécie *bambusa tuldoides* devido a esta espécie apresentar peças retas e uma distância entre nós de aproximadamente 40 cm. Os bambus foram colhidos maduros, mas processados ainda sem secagem para facilitar a confecção das fitas, estas ficaram com um comprimento aproximado de 260 cm, conforme preconizava o desenho gerado pelo computador. Cada seção do bambu foi cortada em oito partes e gerava fitas de aproximadamente 1,5 cm de largura quando acabadas, posteriormente as fitas eram desbastadas na parte interior para diminuição da espessura da parede, visando a obtenção de fitas que pudessem atender tanto aos esforços que seriam solicitadas, quanto às curvaturas necessárias para a execução da estrutura do objeto.

Um gabarito foi criado em uma bancada para a marcação nas fitas das distâncias entre as amarrações. Do total de 56 fitas necessárias para a execução do modelo, foram executados nós (volta do fiel) em 28 unidades, nas marcações feitas previamente na bancada (gabarito). As fitas com os nós, foram dispostas obliquamente sobre a bancada tal qual como no modelo reduzido, a segunda camada de fitas foi colocada por sobre a primeira e dispostas em sentido contrário, e o mesmo procedimento de amarração com a volta do fiel (nó conhecido por sua propriedade de que quanto maior a força aplicada, mais seguro fica o nó) foi executado (Figura 60). Esse processo de amarração faz com que os nós permitam a articulação entre as peças, possibilitando o funcionamento da estrutura como uma pantográfica. Para as amarrações foi utilizado barbante de rami por se tratar de um material natural, compatível com as premissas do projeto e por ser encontrado no mercado na forma de barbante com boa resistência mecânica.

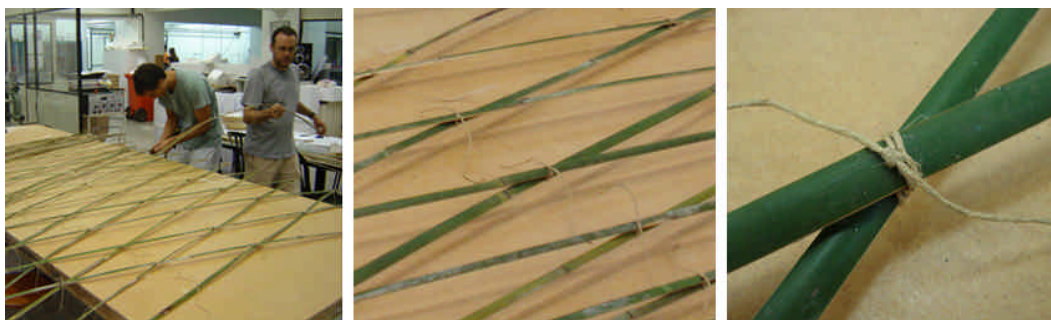


Figura 60: montagem na bancada e detalhe do nó de amarração

A geração da forma com o auxílio do computador conferiu grande precisão ao conjunto, que somado à utilização do gabarito para a marcação dos pontos de corte e amarração, e a execução da maior parte do trabalho em bancada, resultou na simplificação do processo de montagem.

Outra vantagem na utilização do processo de construção com estrutura pantográfica, foi a possibilidade de transporte da estrutura semi-pronta (Figura 61), apresentando baixo peso e volume, podendo ser carregada facilmente por uma pessoa, e possuindo pequeno dimensionamento das peças para um espaço construído relativamente grande.



Figura 61: volume da estrutura

Como nos indicava o modelo reduzido, foi necessária a redução da frequência das peças na parte superior da estrutura, não somente pelo fato das fitas ficarem muito próximas umas as outras, mas para facilitar o trabalho de amarração das fitas, visto que, como no resto da estrutura, esta tarefa seria executada manualmente e seria necessário espaço suficiente para a introdução das mãos por entre as fitas de bambu que compunham o sistema de nervuras. (Figura 62)



Figura 62: estrutura aberta e detalhe da mudança de frequência

Para a montagem da estrutura foram necessárias duas pessoas. Em um primeiro momento a estrutura foi parcialmente aberta para que fosse possível a amarração do anel de compressão superior e garantir o equilíbrio da estrutura, possibilitando assim que esta ficasse de pé. (Figura 63)



Figura 63: abertura da estrutura pantográfica

As medidas dos anéis de compressão e tração também foram obtidas no programa Rhinoceros, e como citado anteriormente, a precisão de suas medidas foi fundamental para garantir a forma precisa do objeto. Com a colocação do anel de tração (borda inferior) a estrutura começou a ganhar rigidez e apresentar a geometria de uma seção cônica. Neste momento a estrutura já podia ser transportada facilmente, não havendo riscos neste procedimento. (Figura 64)



Figura 64: colocação dos anéis, det. anel e forma sustentada pelos anéis

A forma final só foi conseguida com a colocação do anel de compressão intermediário e a amarração das peças na parte superior da estrutura. (Figura 65)



Figura 65: arremate superior

Na amarração da parte superior da estrutura e dos anéis de compressão e tração foi utilizado um sistema diferente de amarração, pequenos orifícios foram executados com furadeira elétrica ainda sobre a bancada. Para a amarração o barbante de rami foi passado através dos orifícios das duas peças a serem unidas, esticou-se as pontas do barbante em sentidos contrários, garantindo assim o alinhamento entre os furos, enrolou-se o barbante nas peças de bambu e a amarração foi finalizada com um nó direito. O resultado dessa amarração mostrou-se excepcional, garantindo uma rigidez bem melhor do que as peças amarradas com o nó articulado, que cediam sob a pressão das curvaturas das fitas de bambu (Figura 66). Como no trecho onde são colocados os anéis de compressão são amarrados três bambus simultaneamente essa solução melhoraria em muito o problema apresentado pela superposição desses nós, que vão afetar diretamente a colocação das “pizzas” de fibrobarro.

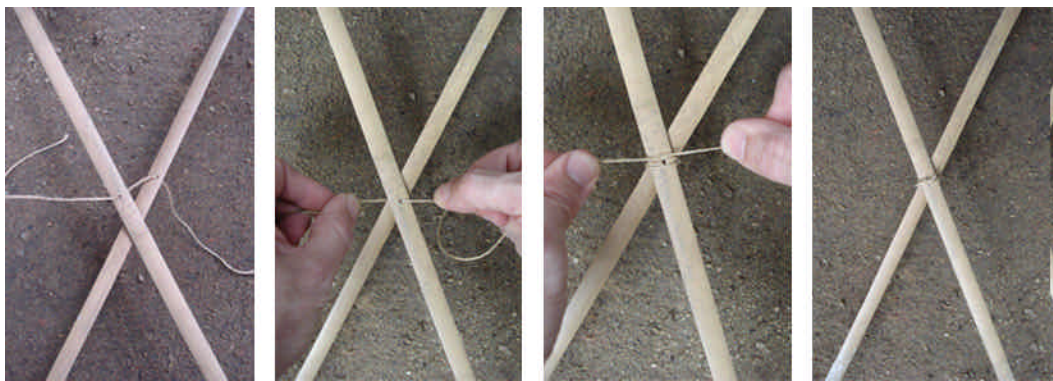


Figura 66: Nós confeccionados a partir de fitas de bambu perfuradas

Concluimos que o melhor procedimento seria a utilização deste sistema para toda a estrutura, as amarrações seriam executadas com nós do tipo de amarrar calçados, um pouco frouxos para permitir a articulação das peças e, uma vez montada a estrutura esses nós seriam desfeitos e utilizaríamos o procedimento de amarração conforme descrito anteriormente para a parte superior da estrutura. Com isso reduziríamos muito o tempo de execução da estrutura, visto que a tarefa mais demorada foi a execução dos nós.

O bambu da forma como foi trabalhado nesse experimento agrega tripla função:

- Serve de fôrma para a colocação do fibrobarro.
- Garante a não deformação do objeto.
- Confere resistência ao conjunto, atuando como nervura da casca de fibrobarro, garantindo sua integridade quando solicitada à esforços pontuais.



Figura 67: detalhe da mudança de frequência do fechamento superior

A rigidez do conjunto foi aumentada com a colocação dos anéis de compressão na parte inferior da estrutura, esses anéis ainda fazem a triangulação das peças que compõem o sistema, tornando o conjunto ainda mais resistente. As fitas de bambu que se mostraram defeituosas para a construção da fôrma/estrutura serão utilizadas para a diminuição dos vãos entre as fitas de bambu e auxiliarão no processo de embarramento. A grande vantagem da utilização da fôrma/estrutura é que além de servir como elemento que vai garantir a forma do objeto, a mesma irá trabalhar como nervura da casca quando a estrutura estiver trabalhando de forma solidária com o fibrobarro. Apesar da rigidez apresentada pela estrutura podemos destacar a leveza como sua principal característica. (Figura 68)



Figura 68: configuração geral do modelo

Para evitar o problema de umidade já levantado anteriormente, a estrutura de bambu foi fixada à uma base de madeira suspensa do solo, confeccionada a

partir de seções de tábuas de pinho com 30 cm de largura. Sua fixação à estrutura, eliminou as deformações apresentadas no anel inferior da mesma, causada pela dimensão reduzida das peças de bambu. (Figura 69)



Figura 69: detalhe da base de madeira

A dúvida que se seguiu, foi a decisão de abrir ou não, o vão de acesso ao interior da estrutura, antes da colocação do revestimento de fibrobarro. O principal problema levantado, foi que a estrutura poderia sofrer algum tipo de deformação com a abertura do vão, fato que não aconteceria, caso sua abertura fosse executada após a colocação e secagem do fibrobarro. Como todos os outros modelos processuais descritos anteriormente, este modelo também fazia parte do processo contínuo do ato de projetar, e a única forma de saber se o modelo sofreria algum tipo de deformação seria a abertura do vão, mesmo sabendo dos riscos que essa tarefa representaria para o modelo.

Primeiramente foi executado um anel composto de várias fitas de bambu que foi fixado à estrutura pantográfica com o auxílio do barbante de rami, posteriormente as peças de bambu da estrutura pantográfica foram cortadas, e para nossa surpresa, a estrutura continuou íntegra, sem sofrer qualquer tipo de deformação. (Figura 70)

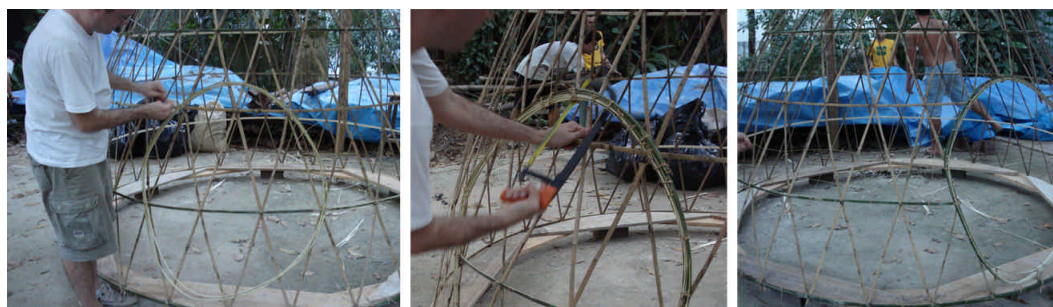


Figura 70: abertura do vão de acesso

O modelo apresentava um último problema a ser resolvido, os vãos entre os bambus da estrutura pantográfica ainda se apresentavam numa dimensão maior que a compatível com o tamanho das “pizzas” de fibrobarro. Este problema já havia sido detectado durante o desenvolvimento dos desenhos no computador, e a solução adotada, foi a redução dos vãos com uma trama de barbante de rami, utilizando a própria estrutura como apoio para amarração (Figura 71). Esta solução foi escolhida pelo fato da confecção da trama de rami despende menor gasto de energia (tempo), que a colocação de um quantidade maior de fitas de bambu, que demandavam muito tempo no seu preparo.



Figura 71: trama de rami para diminuição do tamanho dos vãos da estrutura

Como não possuíamos uma superfície contínua para a colocação das “pizzas” de fibrobarro como no Segundo Experimento, um novo processo de colocação das mesmas precisou ser desenvolvido. Primeiramente foi testada a aplicação de uma nuvem de sisal antes da colocação das “pizzas” de fibrobarro sobre a estrutura pantográfica, visto que já estava previsto a aplicação de uma camada de barro no interior da casca para recobrir a estrutura, garantindo dessa forma a proteção necessária ao bambu. (Figura 72)



Figura 72: estudo de aplicação das “pizzas” defibrobarro

Verificou-se que a nuvem de sisal, além de dificultar a fixação das “pizzas”, não agregava nenhuma qualidade à superfície do interior da casca que receberia a camada de proteção de barro. Portanto a aplicação da nuvem mostrava-se irrelevante.

A aplicação deveria se utilizar dos anéis de tração e dos fios de rami como apoios, visto que esta era a única forma de fixar as “pizzas” de fibrobarro sem que essas caíssem devido ao peso do compósito molhado. As “pizzas” eram aplicadas utilizando as peças de bambu e fios horizontais como apoio, tal qual a colocação de roupas em um varal, sempre garantindo a sobreposição das peças em 5,0 cm.

A grande vantagem da aplicação das “pizzas” de fibrobarro ainda molhadas, era que seu peso próprio tensionava ainda mais os fios de rami, aumentando dessa forma a resistência do conjunto depois de seco. (Figura 73)



Figura 73: processo de colocação das “pizzas”

A colocação das “pizzas” ordenadas em camadas, da parte inferior para a parte superior da estrutura mostrou-se acertada. Como o compósito de fibrobarro deveria ser aplicado ainda molhado, o mesmo possuía um peso próprio muito elevado, e desta forma, caso a estrutura sofresse alguma deformação, esta seria igualmente dividida por toda a superfície da casca e seria praticamente imperceptível, não comprometendo a geometria do experimento. (Figura 74)



Figura 74: Colocação das “pizzas” em camadas sucessivas

O embarramento da estrutura transcorreu por algumas semanas, visto que neste processo, foi utilizada a mão-de-obra de somente duas pessoas trabalhando em média três horas por dia. Apesar de sempre cobrirmos a superfície da casca com uma lona plástica a fim de evitar sua secagem precoce, o processo de secagem foi inevitável pelo grande volume de ar que se formou no seu interior e exterior. A secagem seguia a seqüência da colocação das “pizzas”, sempre acontecendo de baixo para cima. Quando a borda da superfície que receberia o barro (recobrimento de 5,0 cm) apresentava-se seca ou com sua umidade muito baixa, era aplicada água (borrifador manual) em sua borda, a fim de evitar que a camada anterior absorve-se a água da camada que estava sendo executada, comprometendo a união das camadas do compósito.

Para a aplicação da camada de barro para proteção da fôrma-estrutura no interior da casca, o mesmo procedimento de borrifar a superfície da casca será adotado, visando garantir a adesão das camadas do compósito.

Como em todas as superfícies trabalhadas em terra crua, o aparecimento de fissuras foi inevitável. O procedimento adotado foi a aplicação de uma nova camada de barro nos pontos que apresentavam este problema. Uma pintura (2 partes de água + 1 parte de resina PVA + 1 parte de barro peneirado) será aplicada como proteção da casca, de forma a garantir a integridade do compósito. A escolha da resina PVA deu-se por se tratar de um material natural, inerte e que permite que o barro não perca sua capacidade de regulação de umidade, permitindo que a casca “respire”.