

3 Compósitos de terra

3.1. Histórico

O fibrosolo é um nome concebido com o propósito de responder a um material compósito que associa terra crua com grande quantidade de fibra vegetal. Essas fibras participam nos compósitos em uma dosagem proporcionalmente muito maior do que o comum das técnicas tradicionais que utilizam terra crua. Esse nome deriva de uma série de investigações e experimentos realizados no LILD que incorporam conhecimentos tradicionais de construção com técnicas de laminado muito utilizadas no laboratório. Iniciado no trabalho de mestrado de 2001, este compósito passou a ser empregado com constância nos experimentos e em construções, principalmente com a preocupação de garantir qualidade nos fechamentos dos espaços construídos (LEME, 2008, p 148).

O fibrobarro é uma variante do *fibrosolo*: “chamamos também de *fibrobarro*, como uma derivação de *fibrosolo*, quando utilizamos um solo com características mais argilosas neste compósito” (LEME, 2008, p.157). Como o solo utilizado nos experimentos era argiloso, denominou-se fibrobarro o material dos experimentos realizados nesta tese.

3.2. O compósito de fibrobarro

Compósito é um material resultante da união de dois ou mais materiais, sem alteração de suas estruturas moleculares, mantendo individualmente as suas características anteriores à união, “(...) que incorporam uma combinação de propriedades que não é encontrada em um único material” (VAN VLACK, 1970, p. 364). Esta definição engloba tanto compósitos básicos, de uso milenar, como compósitos avançados, de alto desempenho, estes, com desenvolvimento mais recente, a partir da década de 1960.

O fibrobarro é um compósito de matriz cerâmica de barro cru reforçado com fibras vegetais. O patamar atingido pelas pesquisas em curso no LILD permite enquadrá-lo como material factível de uso na construção civil como componente de vedações. Trata-se de uma manta delgada, com espessura em torno de 1 cm,

que pode ser acondicionada em rolos, desde que retido o teor de umidade necessário ao seu preparo. (figura 9).



Figura 9: Manta de fibrobarro em exposição¹, como elemento de vedação para reservatórios d'água (SANTOS, V.J., 2012, p. 28).

Descrevemos a seguir um dos procedimentos para confecção da manta, com uso de gabarito para determinar suas dimensões. O gabarito (de qualquer formato) deve ser posicionado sobre uma base lisa que facilite a desmoldagem. O fundo é forrado com uma camada de fibras vegetais em várias direções. Sobre esta camada lançam-se punhados de mescla de barro, com as mãos, até o recobrimento das fibras e, em seguida, bate-se com as pontas dos dedos de modo a integrar completamente essa mescla às fibras. Mais fibras são incorporadas à mistura ao limite de saturação, e novos punhados de mescla são lançados e misturados às fibras, preenchendo o gabarito. O alisamento superficial pode ser feito com a palma da mão (figuras 10, 11 e 12).

¹ Encontros no Solar – Técnicas Convivenciais – Bambu e Terra 2010. Exposição de objetos de pesquisa desenvolvidos no LILD da PUC-Rio e no LASE da UFMG. Realizada em junho de 2010, no Solar Grandjean de Montigny, na PUC-Rio.



Figura 10: Gabarito losangular feito de corda com 10mm de espessura, colada sobre pedra-mármore, com fibras de sisal espalhadas aleatoriamente no interior do gabarito. Lançamento de punhados da mescla de barro sobre as fibras.



Figura 11: Nova camada de sisal sendo espalhada sobre a mistura. Mescla de barro sendo pressionada com os dedos sobre esta nova camada de fibras. Ao lado estão tigelas com mescla de barro, sisal e água para umedecer as mãos, no processo de confecção da manta.



Figura 12: O gabarito preenchido, percebendo-se as marcas superficiais da pressão dos dedos. A manta já retirada do gabarito, recebendo o tratamento superficial.

Um dos atrativos do fibrobarro é a simplicidade de sua confecção, pois, mesmo em se tratando de um processo artesanal, pode ser seriada em maior escala. Como não demanda uso de produtos químicos, altas temperaturas, prensagem ou qualquer outro procedimento complexo, sua produção pode ocorrer

em pequenos galpões, próximos aos locais de aplicação. Há possibilidade, inclusive, de projetar unidades de produção itinerantes.

Tanto o barro cru quanto as fibras vegetais são biodegradáveis, por não sofrerem alterações físico-químicas nos processos de beneficiamento, ou na produção do compósito.

3.3. A matriz de barro cru

A função da matriz em um compósito – chamada de fase contínua – é dar corpo e manter a integridade do reforço, no caso as fibras vegetais, protegendo-as do contato com o meio exterior. Essa proteção se dá com o recobrimento total das fibras pelo barro, sendo este um dos cuidados tomados durante a confecção do fibrobarro, para não permitir a sua degradação pelo ataque de fungos ou o contato direto com a água. A outra função é promover a transferência de cargas dos esforços externos para o reforço interno.

Encontramos o barro em abundância em todas as regiões do Brasil. Suas jazidas, ou barreiros, localizam-se na superfície do solo. Portanto, a sua extração é simples e pode ser realizada em pequena escala, de preferência próximo aos locais das construções.

O custo energético de produção do barro é próximo de zero, pois a sua extração não requer maquinário de grande porte, podendo até ser feita manualmente. Como os barreiros são de fácil localização, as distâncias a serem vencidas aos locais de manufatura do compósito serão pequenas. O tratamento da matéria-prima não demanda insumos energéticos, bastando desfazer os torrões e peneirar e, se for o caso, dosar com um pouco de argila ou areia.

O barro cru especificado como matriz do compósito fibrobarro é composto essencialmente de argila e areia oriundas da decomposição de rochas. Segundo Milanez (1958, p. 17), um barro muito *liguento*, ou seja, com alto teor de silte e argila, é mais sujeito a trincas e retrações depois de seco e mais sujeito à erosão do que um barro com alto teor de areia, mas este, em compensação, depois de seco se esfarinha. Em termos genéricos, é possível estabelecer uma primeira classificação pelo tamanho de suas partículas (tabela 1)

Tabela 1: Classificação de solo pelo diâmetro de suas partículas.

Nome	Diâmetro (mm)
Cascalhinho	5,0 a 2,0
Areia grossa	2,0 a 0,5
Areia média	0,5 a 0,25
Areia fina	0,25 a 0,1
Areia muito fina	0,1 a 0,025
Silte (ou limo)	0,05 a 0,005
Argila	< 0,005

O barro pode ter quatro estados de consistência: líquido, plástico, semissólido e sólido, em razão da quantidade de água incorporada à mescla. A secagem aparente do barro à sombra e num ambiente com umidade relativa elevada como no Rio de Janeiro pode levar em torno de 30 dias, conforme verificamos nos experimento no LILD (ver capítulo 4).

Outra característica do barro cru, que a perde se for cozido, é a permeabilidade ao vapor d'água, ou seja, a capacidade que tem de absorver e devolver umidade ao ar que o cerca. Isso permite equilibrar o gradiente de pressão de vapor entre o exterior e o interior de um ambiente, regulando a variação de umidade. “O solo cru age no ambiente absorvendo o excedente de umidade quando o ar se satura e libera a umidade absorvida quando o ar resseca” (LEME, 2008, p.106).

Existem métodos práticos, chamados de ensaios de campo, descritos em Milanez (1958, p. 24-26) e Minke (2001, p. 26-28), para determinar o percentual de areia em um dado solo, como o da lavagem de uma quantidade de terra dentro de um vidro de modo que as partículas mais finas de argila e silte sejam retiradas em suspensão com a água, restando apenas partículas mais pesadas de areia (figura 13). São métodos grosseiros, porém suficientes para estimar a composição do barro para utilização em fibrobarro.



Figura 13: Teste feito com barro extraído do barranco ao lado do campo de futebol do campus da PUC-Rio, evidenciando elevado teor de silte e argila.

No preparo da mescla, o barro é peneirado inicialmente numa ciranda (figura 14) para remover os cascalhos e os resíduos vegetais. Em seguida passa por uma *peneira de feijão*² ou *peneira de arroz*³ (quanto mais fino for peneirado o barro, mais rápida será sua hidratação). Depois disso, é umedecido e amassado, em seguida imerso em água e posto para descansar à sombra de modo a garantir a hidratação de todas as partículas, durante pelo menos dois dias. Completado esse ciclo, o excesso de água é retirado e a mescla está pronta para o uso.



Figura 14: Croquis de uma ciranda (peneira grossa, geralmente com malha de $\frac{1}{4}$ ", formando ângulo em torno de 60° com o chão, que pode conter outras malhas, dependendo da destinação do material peneirado). Imagem extraída de Milanez (1958, p. 24).

Durante a confecção dos *brises* (ver item 4.1.2), foi retirada uma amostra de barro, proveniente de escavações próximas ao LILD, para observação⁴. Preencheu-se um tubo de PVC com diâmetro de 14,2 cm e altura de 14,8 cm, perfazendo um volume de 2344 cm³, colocado à sombra para secagem e

² *Peneira de feijão*: peneira nº 4; malha de 4,76mm.

³ *Peneira de arroz*: peneira nº 8; malha de 2,36mm.

⁴ O LILD, no período de 2007 a 2009, funcionou provisoriamente num galpão no Campus São Marcelo, na Estrada da Gávea, 50, Gávea.

acompanhamento da retração, onde ao terceiro dia após o enchimento da forma, já se percebe um pequeno abatimento e descolamento da borda no tubo de PVC (figura 15).

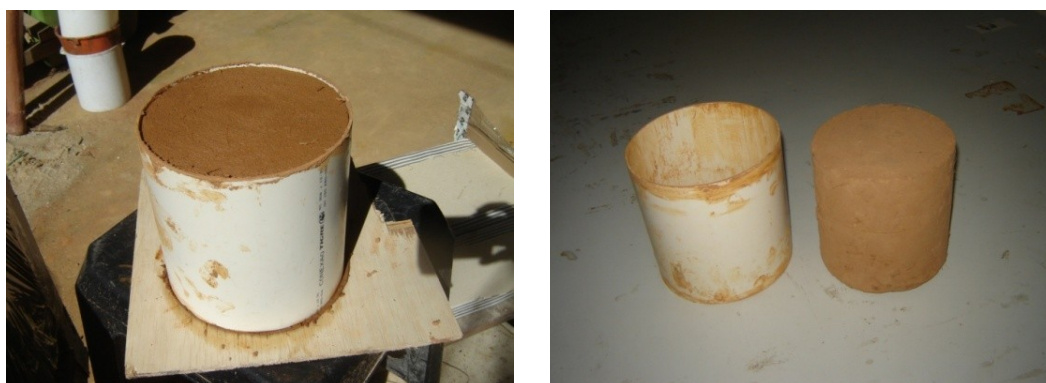


Figura 15: Corpo de prova ao 3º dia do seu preparo. Ao lado o cilindro seco e deformado em comparação com o molde.

Depois de 30 dias, o cilindro foi considerado aparentemente seco. Minke (2001, p. 35) concluiu em seus experimentos que, em climas secos, o barro pode ser considerado aparentemente seco em 15 dias e, em climas muito úmidos, em 30 dias. O abatimento superior constatado no cilindro foi de 1 cm, indicando uma retração na vertical de 7,04%. O seu diâmetro reduziu em 1 cm, o que denota uma retração horizontal de 6,76%, condizente com Minke (2001, p.34), que prevê até 11% de retração linear em mesclas argilosas. O volume de 1.888cm³ indica a retração volumétrica de 19,45%. Segundo Fathy (1980, p.23), o adobe pode sofrer retração volumétrica de até 37%. O cilindro de barro pesou 3.444 g, apresentando a densidade de 1.824 kg/m³, ou seja, condizente com os estudos de Minke (2001, p.25), que apontam densidade entre 1.200 kg/m³ a 2.200 kg/m³, dependendo do adensamento do barro.

Minke (2001, p.38-40) apresenta valores para algumas propriedades do barro, como o calor específico de 1kJ/kg.K⁵ e o módulo de elasticidade, que varia de 0,59 a 0,69 GPa, além de gráficos dos quais extraímos dados para as tabelas 2, 3 e 4, na página seguinte.

⁵ Calor específico de 1kJ/kgK. Na edição consultada do livro “*Manual de Construcción en Tierra*”, o calor específico apresentado na p. 38 tem o valor grafado como sendo 0,1KJ/KgK (sic), porém em seguida vem indicado ser igual a 0,24Kcal/Kg°C, como 1Kcal = 4,1868KJ => 0,24Kcal = 1,0048KJ, ou seja, aproximadamente 1kJ.

Tabela 2: Variação do coeficiente de condutibilidade térmica pela densidade do barro.

Barro maciço	
Condutibilidade térmica (W/m°C)	Densidade aparente (kgf/m³)
0,5	1200
0,6	1400
0,8	1600
0,9	1800
1,2	2000

Tabela 3: Variação da resistência à compressão pela densidade do barro.

Compressão permitida para barros DIN 18954 ⁶	
Resistência à compressão (kgf/cm²)	Densidade (kg/m³)
20	1600
30	1900
40	2200

Tabela 4: Variação da resistência à compressão do barro maciço pela densidade, devido ao volume de palha inserido.

Resistência à compressão do barro com palha incorporada		
Resistência à compressão (kgf/cm²)	Densidade aparente (kgf/m³)	Palha (% / massa)
22,40	1882	0
14,27	1701	1
13,25	1571	2
11,21	1247	4
3,05	872	8

Analisando os dados contidos nessas tabelas, chegamos à conclusão de que o coeficiente de condutibilidade térmica e a resistência à compressão aumentaram com a densidade. Concluimos também que a inclusão de palha diminui a densidade, reduzindo, conseqüentemente, a resistência à compressão e o coeficiente de condutibilidade térmica. Como o que buscamos é a leveza do material, ao introduzir palha até o ponto anterior ao de não conseguir plasticidade estamos reduzindo o peso por metro quadrado de vedação, com a vantagem de aumentar a resistência à passagem da onda de calor.

3.4. O reforço de fibras vegetais (sisal)

A função do reforço – chamada de fase descontínua – é contribuir no desempenho do compósito: “(...) o uso de fibras vegetais aumenta a tenacidade⁷ e

⁶ Norma DIN 18954 (MINK, 2001, p.41). Na Alemanha, após a Segunda Guerra Mundial, foi adotada esta norma para construções de muros de terra.

a resistência ao impacto e a ductilidade⁸ de matrizes frágeis como as argamassas, ou seja, aumenta a capacidade de absorver energia” (TOLEDO FILHO, 1997, p.1). Inclui outras vantagens, como diminuir a transmitância térmica⁹, aliviar o peso, além de reduzir as trincas (figura 16). Sua influência varia de acordo com a concentração e a direção do arranjo de suas fibras.



Figura 16: Placa de barro seccionada por grandes sulcos devido à retração durante a secagem. À direita, placa de fibrobarro confeccionada com a mesma mescla, percebendo-se rachaduras superficiais em maior quantidade e estreitas, resultado da maior coesão.

Leme (2008, p. 149) utilizou várias fibras vegetais em seus experimentos, tais como fibra de coco, piaçava, jornal picado (celulose), fibra de tronco de bananeira, fibras de bambu e grama do tipo esmeralda, entre outras. Neste trabalho utilizamos apenas o sisal, por ser um material amplamente divulgado no âmbito da construção civil, encontrado em lojas de materiais de construção e com preços acessíveis.

O sisal é uma matéria-prima renovável e sua cultura se adapta às regiões semiáridas, sendo Bahia e Paraíba¹⁰ os estados de maior produção. Desse modo, não é necessário o desmatamento de florestas nem a disputa por terras férteis com outros cultivos voltados para a produção de alimentos. A sua exploração não provoca danos ambientais, e o beneficiamento não utiliza materiais que poluem ou produzem dejetos. O seu uso fortalece a atividade rural do plantio e manufatura das fibras, o que reforça as culturas locais de produção, tornando-se, desse modo, num fator de fixação das populações rurais próximas às áreas de cultivo.

⁷ Tenacidade: resistência à ruptura pela tração.

⁸ Ductilidade: propriedade que representa o grau de deformação que um material suporta até o momento de sua fratura.

⁹ Transmitância térmica: é o inverso da resistência térmica total, incluindo as resistências superficiais interna e externa.

¹⁰ EMBRAPA. Disponível em: www.cnpa.embrapa.br/produtos/sisal. Acesso em 26/01/2013.

“Considerando-se que a estrutura rural brasileira, em especial na região Nordeste, é insuficiente e inadequada para atender às necessidades de suas populações, no que se refere a obras de apoio à produção agrícola, habitação, saneamento, educação e lazer, o uso de fibras naturais na produção de elementos de cobertura e revestimento, painéis divisórios, componentes habitacionais etc. pode contribuir para o estabelecimento desta infraestrutura” (TOLEDO FILHO, ENGLAND e GHAVAMI, 1997, p. 79).

O nome científico do sisal é *agavee sisalana*, sendo o Brasil o seu maior produtor, com produção anual de 140.000 toneladas¹¹. Originário da Península de Yucatã, México, o sisal é uma planta semi-xerófila¹² com adaptação às regiões tropicais e subtropicais, suportando secas prolongadas e temperaturas elevadas (figura 17).



Figura 17: Pés de *agavee sisalana*, vegetal rústico com folhas longas e fibrosas. Secagem ao ar livre, sem necessidade de estufas. Obs.: nas encostas do Rio de Janeiro, floresce a pita *furcraea foetina*, de aspecto visual semelhante.

“O sisal é uma fibra lignocelulósica leve e atóxica, que apresenta alto módulo de resistência específica, custa aproximadamente dez vezes menos que a fibra de vidro e, ao contrário desta fibra inorgânica, causa menos danos por abrasão aos equipamentos e moldes. Entre outras vantagens do sisal podemos apontar: (...) boas propriedades como isolante térmico e acústico (...), alta tenacidade, resistência à abrasão (...)” (ANGRIZANI, et al., 2006, p.2).

O processo de obtenção da fibra de sisal inicia-se pelo desfibramento: primeiro as folhas são separadas por tamanho para melhorar o rendimento da produção, passando em seguida por uma máquina na qual são golpeadas e raspadas para eliminar a polpa que envolve as fibras. Após o desfibramento, as fibras são estendidas para a secagem em espaldadeiras de arame, de preferência ao

¹¹ IBID.

¹² Vegetação xerófila: vegetação adaptada à aridez. Possui raízes compridas, aprofundando-se bastante no solo para buscar água. Apresenta folhas em forma de espinhos e muitas vezes cobertas de ceras, para diminuir a evaporação.

sol. Dois dias de exposição ao sol são suficientes para ter as fibras secas e alvas. O armazenamento das fibras secas deve ser em local arejado, fresco, livre de umidade e sobre estrado de madeira, onde as fibras são arrumadas bem estendidas, sem dobras, em feixes de 15 kg a 20 kg. Devem ser observadas diariamente quanto ao surgimento de fungos, existência de goteiras e outros elementos causadores de danos, conforme preconiza Toledo Filho (1997).

O sisal é comercializado em fardos de 1,50 x 0,50 x 0,70 m, com peso que varia de 200 kg a 250 kg. Portanto, os custos energéticos de produção estão limitados ao maquinário de desfibrar e de prensar os fardos e ao transporte para sua distribuição dos centros de produção aos locais de consumo.

Dos ensaios realizados por Toledo Filho (1997, p.36) extraímos valores das seguintes propriedades físicas e mecânicas das fibras de sisal (tabela 5):

Tabela 5: Dados contidos nas tabelas 3.1 e 3.2 (TOLEDO FILHO, 1997, p.36).

PROPRIEDADES	Min.	-	Max.	-	Média
Diâmetro (mm)	0,08		0,30		0,12
Densidade (kN/m ³)	7,50		10,70		9,00
Teor de umidade natural (%)	10,97		14,44		13,30
Absorção de água após 5 min. em água (%)	67,00		92,00		82,00
Absorção em água na saturação	190,0		250,0		230,00
Resistência à tração (MPa)	227,8		1002,3		577,50
Módulo de elasticidade (GPa)	10,94		26,7		19,00
Deformação na ruptura (%)	2,08		4,18		3,00

Observar que a densidade média averiguada por Toledo Filho (1997, p. 36), de 918kgf/m³, é inferior à citada por Arsene (2001, p. 6), de 1.370 kgf/m³. Portanto, para os cálculos efetuados neste trabalho utilizaremos um valor intermediário de 1.200 kgf/m³ para densidade do sisal.

No caso de fibras vegetais existe a dificuldade de mensurar a área da seção devido ao seu formato irregular (figura 18) e, conseqüentemente, à sua densidade. Os fios de sisal que manuseamos são, na verdade, compostos por muitas fibras, tanto no comprimento quanto em sua seção.

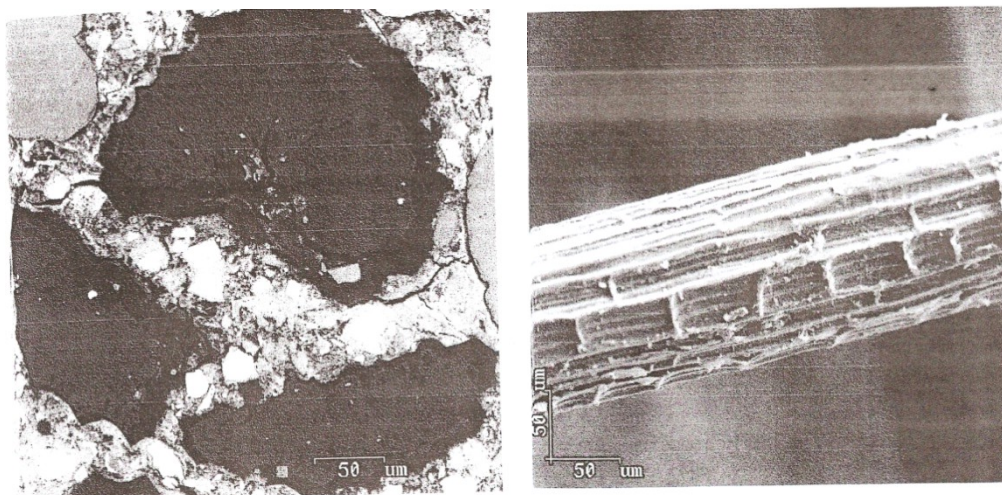


Figura 18: Imagens da fibra de sisal por microscopia eletrônica, seção transversal e longitudinal reproduzidas de Toledo Filho (1997, p 18, figuras 2.1a e 2.1.b).

O sisal adquirido em lojas de materiais de construção deve ser desfiado.

“O método (...) tradicionalmente empregado nas técnicas de estuque, consistiu em colocar uma pequena quantidade de fibra na ponta de uma varinha de bambu e vibrá-la com rápidos movimentos cíclicos verticais, transformando a matéria numa pequena *nuvem* (...)” (ALVARES, 2008, p.65).

O sisal comercializado contém fios de comprimento superior a 60 cm que, na confecção do fibrobarro, são espalhados em várias direções, além de uma parcela ser picada. Tais fios conferem ao compósito um comportamento isotrópico em relação aos esforços, ou seja, este reage com o mesmo desempenho em qualquer direção.

São consideradas fibras longas as que têm comprimento muito superior ao seu diâmetro; fibras curtas as que têm comprimento poucas vezes maior que o diâmetro. As fibras que apresentam comprimento equivalente ao diâmetro são chamadas de particuladas. Portanto, mesmo as fibras picadas com comprimento entre 2 cm e 5cm são denominadas de longas, pois o comprimento é muitas vezes superior ao diâmetro. Caso as fibras mais curtas não promovam a ancoragem, servirão apenas de carga no compósito. Carga esta que é benéfica ao desempenho térmico e alívio do peso do compósito.

3.5. A interface

Através da interface é que ocorre a transmissão das tensões externas às fibras. Como a matriz de barro tem propriedades elásticas bem menores do que as

das fibras de sisal, o carregamento sofrido pelo compósito vai gerar deformações cisalhantes que induzem tensões cisalhantes na interface, tensões estas que são transmitidas às fibras. O módulo de elasticidade da fibra de sisal é de 26,7GPa (tabela 5), e o módulo de elasticidade do barro é entre 0,59 e 0,69GPa (MINKE, 2001, p.42), ou seja, da ordem de 40 vezes menor do que o da fibra de sisal.

Existem estudos com polímeros para o tratamento da fibra de sisal voltado para a proteção quanto à agressividade da matriz (no caso, o cimento), buscando maior ancoragem na matriz. Nos estudos de Angrizani (2006), as fibras de sisal foram tratadas com água destilada e solução alcalina (NaOH) e submetidas a testes de tração, flexão e impacto, sendo estes comparados com o resultado para fibras não tratadas. Nenhum dos tratamentos apresentou resultados expressivos, acrescentando, apenas, outra etapa no processo produtivo.

No caso do fibrobarro, a agressividade da matriz é nula, e a ancoragem que as fibras com comprimento em torno de 5cm proporcionam nos parece suficiente aos esforços de tensão, tração, compressão e impacto que as vedações possam sofrer.

3.6. Mistura barro/fibras – proporções

A linha que vem norteando a pesquisa do fibrobarro é a de trabalhar inserindo a maior quantidade de fibras que for possível sem desagregar o compósito. Na engenharia de materiais, essa proporção é mensurada pela correlação de volumes (fator volumétrico) ou de massas (fator mássico). No fibrobarro, porém, a quantidade ótima não é simples de estabelecer. Leme (2008, p.155) indica uma correlação volumétrica de 50% entre o barro peneirado e o sisal desfiado, ou seja, comparando volumes aparentes.

Minke (2001, p.57) alerta para a dificuldade de se obter a densidade de um compósito de barro com palha, considerando um único método exato para se obter a densidade: o corte de um cubo a partir de um corpo de prova maior, de modo a eliminar as pontas dobradas da palha nos cantos, assim como as trincas superficiais. Quanto maior a amostra, maior será a precisão devido às perdas por erosão nas bordas durante o corte e a manipulação.

O barro peneirado apresentará pesos distintos para o mesmo volume, dependendo da finura dos seus grãos: quanto mais fino, mais peso terá. O sisal,

cuja densidade da fibra é próxima ou superior a 1000 kgf/m^3 , quando em fardos tem densidade aparente em torno de 428 kgf/m^3 (ver item 3.4.). Em virtude dessas variações, talvez o mais simples, para a divulgação de um sistema construtivo popular, seja adotar uma prática antiga, já consagrada, da correlação entre volume e peso: “A terra e a areia são misturados numa proporção de 1:1/3 por volume (...). Para cada metro cúbico de mistura adicionávamos 20,43 kg de palha e misturávamos tudo com água” (FATHY, 1980, p.114).

Buscando tal correlação, confeccionamos quatro placas com 1 litro de barro peneirado na peneira nº 4 (apêndice 1). A primeira apenas com barro, lançado com a mão e batido com a ponta dos dedos, como numa manta de fibrobarro. A segunda adicionando fibras de sisal picadas, em torno de 5 cm, até a saturação (66 g). Depois outras duas, com respectivamente 2/3 (44 g) e 1/3 (22 g) de sisal para 1 litro de barro (figura 19). Com isso, para a placa com mais sisal chegamos a uma relação de 66 kgf/m^3 de barro, bem superior à adotada por Fathy. Calculamos a densidade aparente da placa – 1.580 kgf/m^3 , valor que coincide com Betim (2008, p. 157): “Foi aferida em material seco uma densidade média da ordem de 1.500 kg/m^3 , em casca de fibra de sisal com espessura fina média em torno de 9 mm”.



Figura 19: Gabarito com 1 cm de altura e fundo forrado com filme plástico para permitir a retração do barro sem que ocorresse o seccionamento da placa apenas com o barro. Placas enfileiradas.

Com os resultados obtidos no apêndice 1, montamos a Tabela 6.

Tabela 6: Alívio de massa por inclusão da fibra no compósito.

Placas de barro	Retração linear (%)	Densidade aparente kg/m^3	Alívio de massa(%)
Só barro	11	1.980	-
Barro + 22g de sisal	9	1.845	6,8
Barro + 44g de sisal	6,5	1.753	11,5
Barro + 66g de sisal	4	1.580	20,3

O alívio de massa é devido não só à menor densidade do sisal, mas principalmente ao teor de vazios criado pela inclusão da fibra na mescla de barro na composição do fibrobarro.

3.7. Teor de vazios

A inserção de vazios repercute positivamente no desempenho térmico do compósito aliviando a sua densidade, como observado na tabela 2, item 4.3, que mostra a queda progressiva da condutibilidade térmica com a redução da densidade do barro. Angrizani (2006), porém, alerta que o maior teor de vazios pode levar a uma maior absorção de umidade dos compósitos. Para o fibrobarro, isso não chega a ser um problema, pois, como a matriz é de barro cru, respira, equilibrando a umidade com o ambiente.

Um fator que contribui para o aumento do teor de vazios é a elevada capacidade de absorção de água da fibra de sisal (ver tabela 5, item 3.4). Uma fibra, com cinco minutos de imersão, absorve perto do seu volume e, até saturar, absorve mais de duas vezes o seu volume. A consequência é que, ao ser integrada à mescla de barro, a fibra se expande com a absorção da água ao redor e se retrai quando o fibrobarro seca, diminuindo a densidade da interface e formando vazios, que reduz o desempenho mecânico do compósito.

3.8 Carga

Cargas são materiais inertes mais baratos inseridos num compósito de modo a reduzir custos da matriz, sem prejudicar o seu desempenho. Nesse compósito com matriz de barro cru, não há razão para acréscimo de cargas, devido ao baixo valor comercial do barro.

3.9. Tratamento impermeabilizante

Quanto à impermeabilização do barro cru, foi aplicada a pasta cal sobre sua superfície, pois essa pasta permite que o barro respire. Não é uma impermeabilização para a exposição direta e continuada às intempéries, mas ela é capaz de resistir ao tempo de um reparo. Ou seja, a pasta cal não é à prova d'água, mas sim resistente à água. O seu uso como acabamento externo ao fibrobarro, nesse

sistema construtivo em desenvolvimento, pressupõe a existência de uma sobrecobertura, esta, sim, impermeável (ver capítulo 5.3).

Já a resina poliuretânica vegetal, utilizada como impermeabilizante em alguns experimentos descritos neste trabalho (capítulo 4), pode vedar de fato a superfície do fibrobarro, porém, como consequência, reduz a troca de umidade do ar entre o interior e o exterior. No caso da sobrecobertura, a aplicação de resina é uma opção, que já vem sendo testada no LILD, na veladura de tecidos com carga de barro cru.

Quando o barro cru é encharcado, adquire consistência plástica e perde a sua capacidade estrutural, mesmo que reforçado por fibras. Na figura 20 vemos a consequência da chuva sobre a cúpula catenária de Álvares (2008), revestida com fibrobarro sem receber proteção impermeabilizante, onde se observa as deformações provocadas pelo encharcamento, mesmo estruturado por pantográfica de fitas de bambu. O fibrobarro absorveu água, aumentando o seu peso e perdendo a estabilidade. A consequência foi o adernamento para o lado onde a base ficou encharcada pelo acúmulo de chuva sobre o plástico. No detalhe vê-se o rasgo junto à base, resultado do esforço cisalhante a que foi submetido pela deformação.



Figura 20: Cúpula catenária no canteiro experimental do CAU da PUC-Rio.

3.10. Desempenho térmico: Norma NBR 15.575

A NBR 15.575 – “Desempenho de Sistemas Construtivos para Prédios de até 5 pavimentos”, em conjunto com a NBR 15.220 – “Desempenho Térmico de Edificações Unifamiliares de Interesse Social”, são as primeiras normas brasileiras a estabelecer parâmetros de desempenho para a construção civil. A NBR 15.575 é dividida em seis partes: 1. Requisitos gerais; 2. Requisitos para os sistemas estruturais; 3. Requisitos para os sistemas de pisos internos; 4. Sistemas

de vedações verticais externas e internas; 5. Requisitos para sistemas de cobertura; 6. Sistemas hidrossanitários. Destas, são do interesse: Parte 1, item 18 – Adequação ambiental; Partes 4 e 5, item 11 – Desempenho térmico.

Mesmo não apresentando parâmetros para a adequação ambiental, a NBR 15.575 recomenda o uso de materiais que causem menos impacto ambiental desde a exploração dos recursos naturais até a utilização final. O “fibrobarro”, composto de barro cru e fibras vegetais, pode ser enquadrado nessa recomendação.

Quanto à adequação ao desempenho térmico de vedações verticais, os valores máximos admissíveis para a transmitância térmica das paredes externas (tabela 14) variam por zonas climáticas, sendo as de nº 3 a 8 as de maior exigência, com: $U \leq 2,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ para paredes de cor escura e $U \leq 3,7 \text{ W/m}^2\text{K}$ para paredes claras. Para atingir estes valores respectivamente, uma vedação de fibrobarro necessitaria de espessura de 18,4 cm e de 8 cm (ver cálculos no apêndice 2).

Os valores mínimos admissíveis para a capacidade térmica¹³ de paredes externas (tabela 15) variam por zonas climáticas, sendo as zonas de nº 1 a 7 que exigem maior desempenho: $CT \geq 130 \text{ KJ/m}^2\text{K}$. Para atingir este valor, uma vedação de fibrobarro necessita de no mínimo 8,3cm de espessura (apêndice 2).

Quanto à adequação ao desempenho térmico para sistemas de cobertura, os valores máximos admissíveis para a transmitância térmica (tabela 3) variam por zonas climáticas, sendo as de nº 3 a 8 as de maior exigência, com: $U \leq 1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ para coberturas de cor escura e $U \leq 2,3 \text{ W/m}^2\text{K}$ para coberturas claras. Para atingir estes valores respectivamente, uma vedação de fibrobarro necessitaria de espessura de 14 cm e 32 cm (ver cálculos no apêndice 3).

Não é exigida capacidade térmica para as coberturas nem para a vedação externa na Zona Bioclimática 8, de clima quente e úmido, que abarca 53,7% do território nacional, inclusive a Cidade do Rio de Janeiro.

As espessuras tanto para paredes quanto para cobertura vão muito além da espessura das mantas de fibrobarro, indicando que o sistema construtivo em estudo deve necessitar de sobrecobertura ventilada para atingir a transmitância térmica máxima desejada.

¹³ Capacidade térmica: quantidade de calor necessária para variar em uma unidade a temperatura de um sistema. No caso, se refere à capacidade térmica de componentes (Ct) que é o quociente da capacidade térmica de um componente pela sua área ($\text{J/m}^2\text{K}$).