

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Construção Sustentável

O uso do solo como material de construção tem cerca de 10.000 anos. As primeiras cidades foram construídas com terra, atualmente, para a construção de moradias, emprega-se materiais de elevada energia incorporada, de difícil reciclabilidade, caros e alguns incorporam elementos tóxicos, como o caso das telhas de fibrocimento, que utilizam amianto, substância prejudicial à saúde humana, como afirmam Ghavami e Sales (2005).

Algumas das grandes civilizações, berços da cultura ocidental como a persa e a egípcia, construíram cidade inteiras com terra crua. A terra foi empregada para edificar fortes, castelos, muralhas, templos, habitações, entre outros, em lugares como o Saara, África Central e Oriental, América Latina e grande parte da Europa, incluindo lugares com grandes índices de pluviosidade como Alemanha, França, Suécia, Noruega e Dinamarca (TERRA, 2006). O bom desempenho das construções é prova incontestável das possibilidades de emprego desse material de qualidade (SOUZA, 1993).

As figuras 1a,b ilustram ruas e casas da cidade de Bam (Irã). Construções habitacionais em Gana (África) podem ser vistas nas figuras 2a,b e 3. Construções habitacionais (Figura 4a) e um templo indígena (Figura 4b) em Chan Chan, no Peru. As figuras 5a,b,c,d, apresentam habitações em SuperAdobes e as figuras 5e,f referem-se a um centro de vivência na Califórnia (EUA), projeto do arquiteto Nader Khalili.

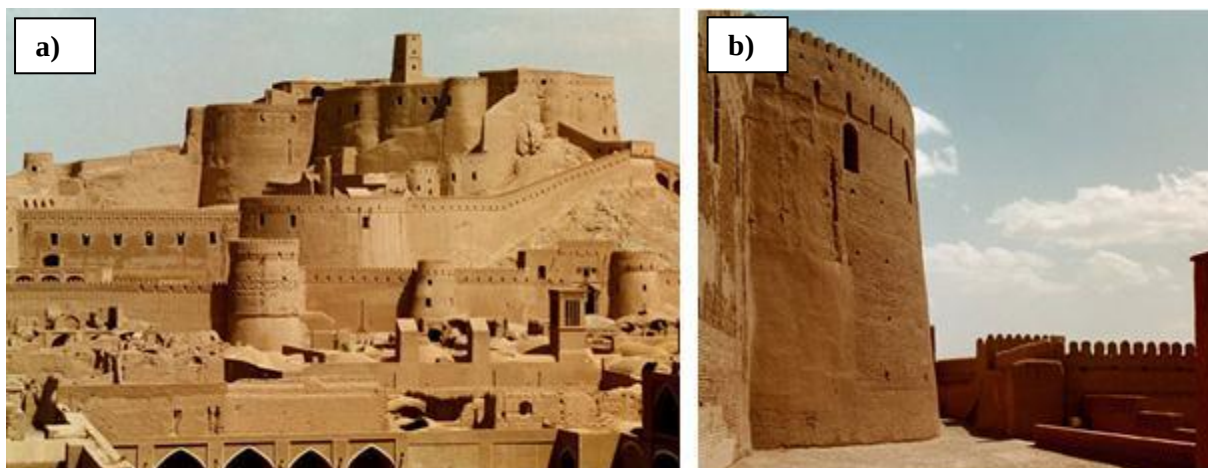


Figura 1. Ruas e casas da cidade de Bam – Irã, Ásia (GHAVAMI, 2007).

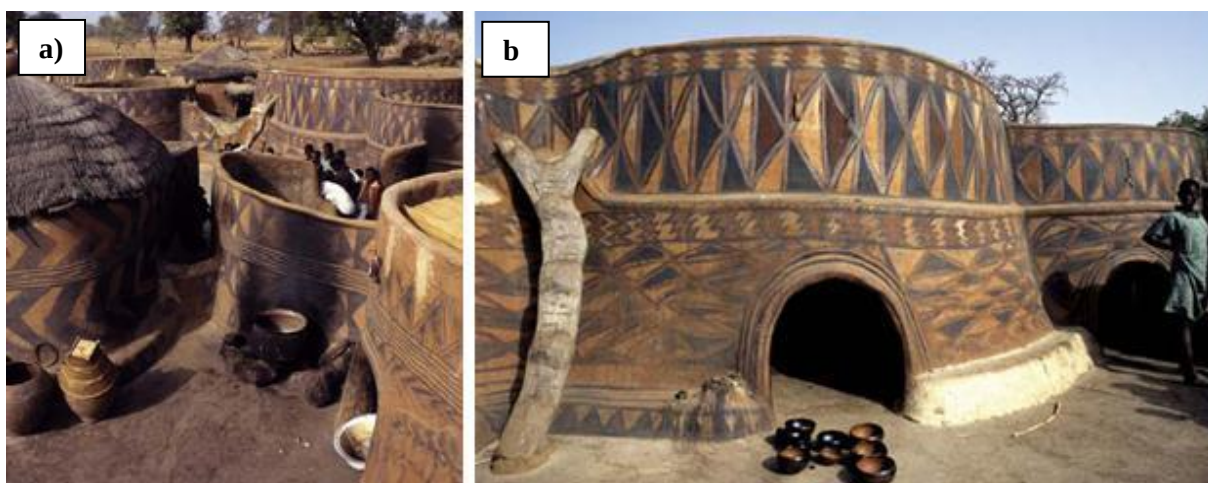


Figura 2. Construções da cidade de Navrongo – Gana, África (CRATERRE, 2004).



Figura 3. Construções em Gana, África (CRATERRE, 2004).

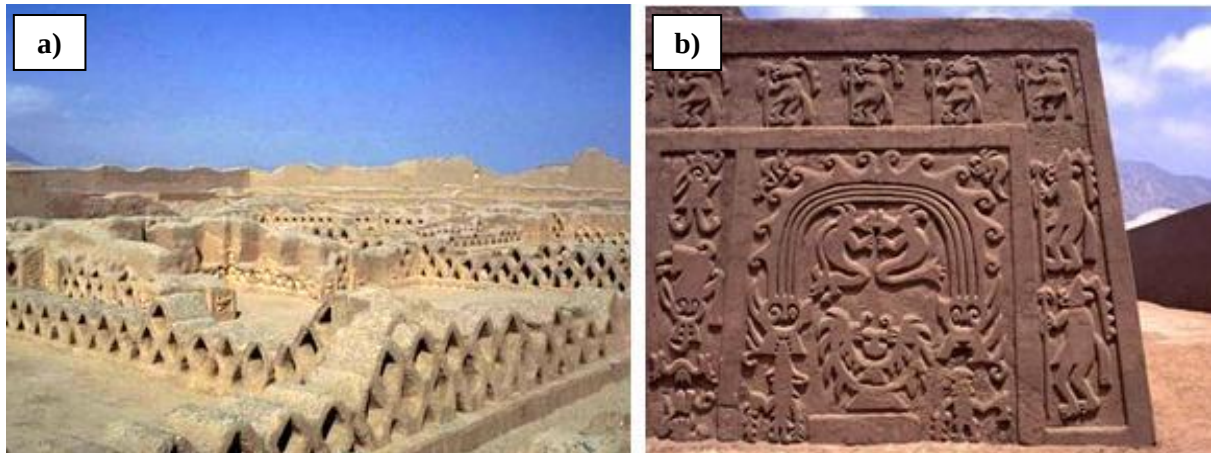


Figura 4. Construções em Chan chan – Perú, América do Sul (CRATERRE, 2004).

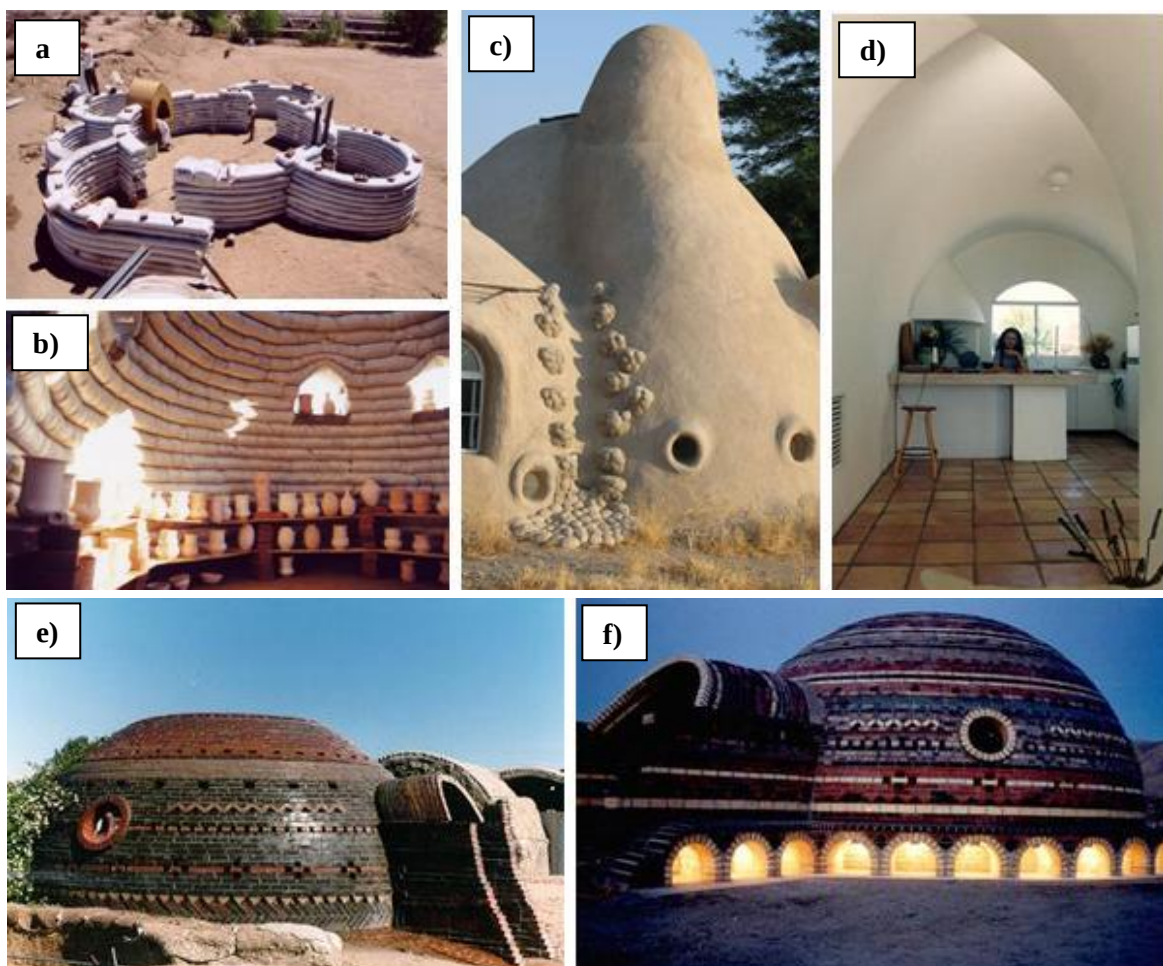


Figura 5. Construções na Califórnia – EUA, América do Norte (CALEARTH, 2007).

A Mesquita de Djenna em Timbuktu no Mali é o maior edifício de adobe do mundo (figura 6). As paredes são estruturais, suportando o peso do telhado sem necessidade de introdução de qualquer estrutura de apoio. Na figura 7, vê-se a vila em Taos, Novo México, construída entre 1000 e 1450 d.C..



Figura 6. A Mesquita de Djenna no Mali, o maior edifício de adobe do mundo (RECRIAR, 2013).

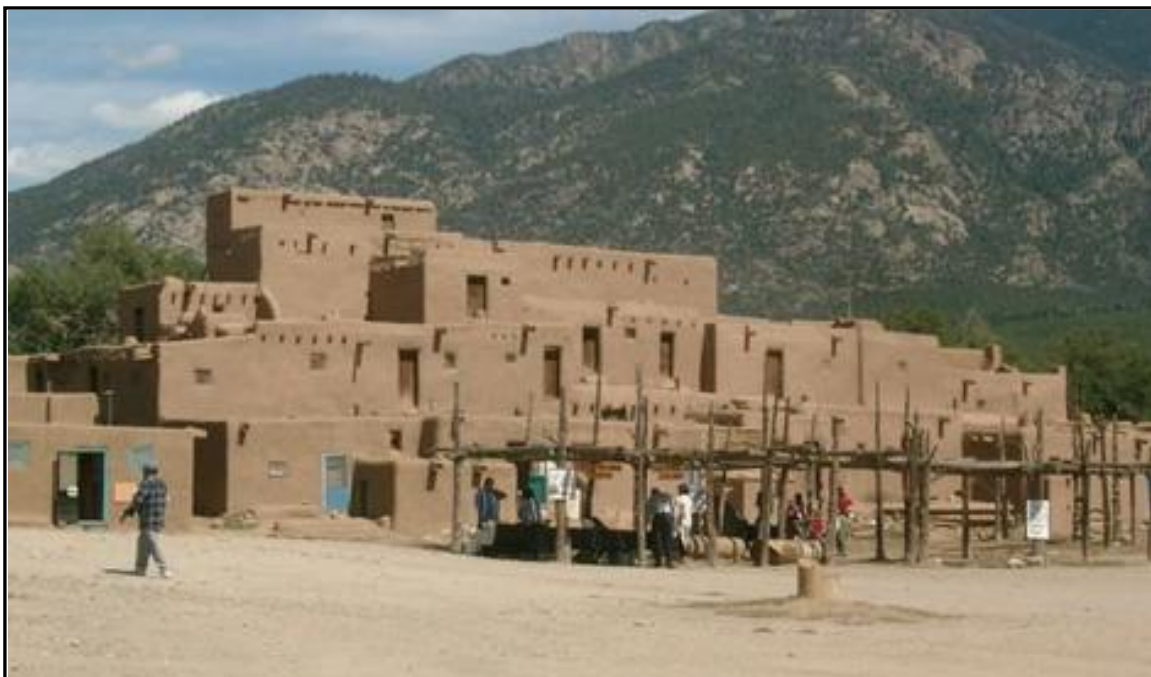


Figura 7. Vila em Taos, Novo México (RECRIAR, 2013).

A figura 8 ilustra a denominada Casa dos Hakka, construída pelo povo Hakka, que começaram a imigrar do sul para o norte da China no século XVII. Esta construção foi erguida como fortificação para proteger a população contra ataques, apresentando somente uma entrada e sem janelas no nível inferior. Construída em taipa de pilão a obra possui 10.000 m² de área coberta.

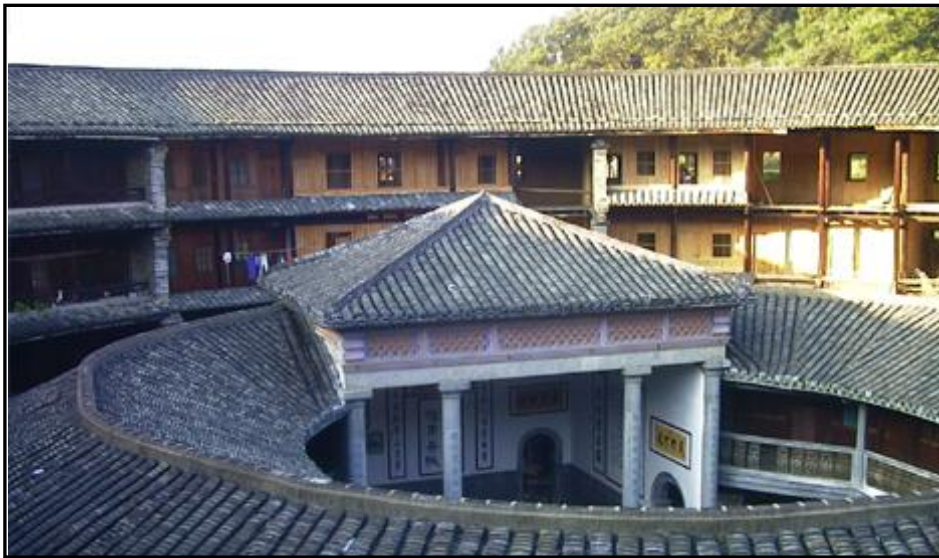


Figura 8. Obra em taipa de pilão construída como fortaleza para o povo Hakka (RECRIAR, 2013).

Nas figuras 9 e 10, pode -se observar o uso da taipa de pilão na construção de uma residência em Melbourne - Austrália, obra de John Wardle Architects, em 2002, a área construída equivale a 400 m² (MINKE, 2006).



Figura 9. Residência em Melbourne - Austrália (MINKE, 2006).



Figura 10. Vista lateral, residência em Melbourne - Austrália (MINKE, 2006).

Nas figuras 11 e 12 vê-se a capela da reconciliação, Berlim - Alemanha, construída em taipa de pilão por Reitermann e Sassenroth em 2000. A área construída é de 315 m².



Figura 11. Entrada da capela da reconciliação, Berlim -Alemanha (MINKE, 2006).

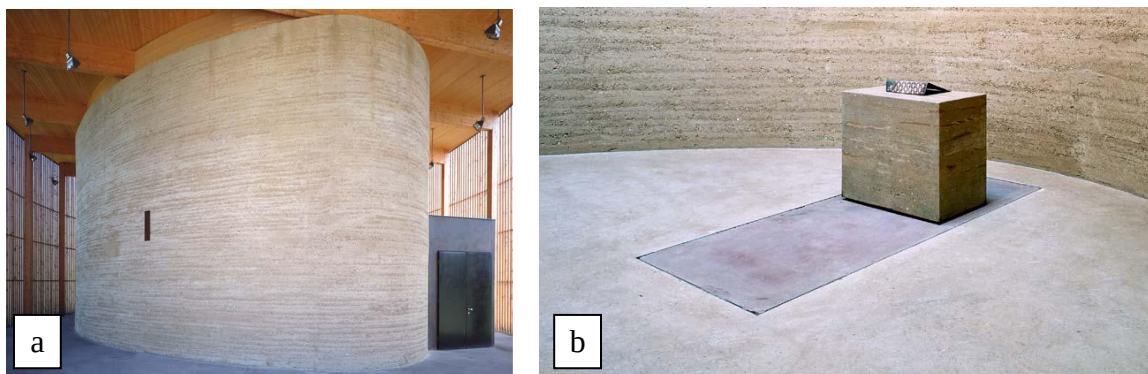


Figura 12. (a) Espaço interno da capela; (b) altar em taipa de pilão (MINKE, 2006).

Houben e Guillaud (1994) garantem que a terra é, sem dúvida, o material de construção mais utilizado no mundo, sendo difícil encontrar um país que não possua herança destas construções. No Brasil, cidades como São Paulo, Salvador, Rio de Janeiro, Ouro Preto, Diamantina e Paraty, entre outras, têm em comum mais de quatro séculos de história que testemunham o uso intensivo de técnicas de construção com terra crua. Segundo os autores, o solo é definido como o resultado de um processo longo de deterioração da rocha-mãe e evolução físico-química. Dependendo da rocha de origem e das condições climáticas, aparece sob uma infinidade de formas e variedade de características. O solo pode, também, ser descrito como o material constituído de partículas sólidas que apresentam, entre si, vazios parcial ou totalmente preenchidos por água. É um sistema polifásico, formado por fases sólidas, líquidas e gasosas. Os sólidos formam a maior parte do material, enquanto que os líquidos e gases preenchem os espaços vazios. As proporções relativas das três fases podem ter uma influência significativa sobre o comportamento de um solo (KERALI, 2001).

A escolha da técnica construtiva dependerá, entre outros, das características do solo, além do clima local e dos condicionantes físicos existentes, como apontado por Lopes (2002). Dentre as possibilidades de utilização, Houben e Guillaud (1994) apontam uma dúzia de diferentes métodos de construção, atentando para as dezenas de variações que cada uma delas, de lugar em lugar, nos cinco continentes, têm-se: Terra escavada; Terra cobrindo; Terra preenchida; Terra recortada; Terra compactada; Terra moldada diretamente; Terra empilhada; Terra extrudada; Terra moldada; Terra escoada; Terra aplicada ou; Terra revestindo.

No Brasil, da mesma forma que em Portugal, as técnicas mais utilizadas foram o adobe (terra moldada), a taipa de pilão (terra compactada) e a taipa de mão (terra aplicada), encontrando-se exemplares em praticamente quase todo território brasileiro (LOPES, 2002). De uso recente, destacam-se os Blocos de Terra Comprimida (BTC), técnica construtiva em que o solo é compactado dentro de uma forma metálica. Esta técnica permite a incorporação de fibras vegetais além de resíduos industriais, agroindustriais, mineração, entre outros.

Como principais vantagens da arquitetura com terra crua, Mukeerji e CRATerre (1988, apud LOPES, 2002) de uma maneira geral, citam a disponibilidade da terra em grandes quantidades; baixo custo para escavação e transporte, quando a terra é proveniente do próprio local da obra; a fácil assimilação por mão de obra não qualificada; a resistência ao fogo; o desempenho climático; a baixa exigência de energia para manufatura; a possibilidade do uso do solo não estabilizado, permitindo sua reutilização ilimitada e, por fim, é um material não poluente.

O principal inconveniente da construção em terra crua é sua baixa resistência na presença de água. Quando não são tomadas as devidas precauções, as paredes em terra podem ser facilmente degradadas pela ação da água (NEVES, 2011). Lourenço et al. (2011) comentam que o princípio básico de construir com terra é de evitar o contato entre as paredes e o solo. A terra, mesmo quando estabilizada com cimento, é susceptível à ação da água, a qual diminui a sua capacidade de resistência. Neves (2011) observa que a possibilidade da ascensão de água nas paredes por capilaridade deve ser prevista e evitada, construindo fundações estanques e grandes coberturas, além de um revestimento uniforme nas paredes. Das (1983, apud KERALI, 2001) comenta que a baixa resistência à tração, abrasão, alta absorção de água e a instabilidade dimensional durante ciclos de molhagem e secagem, dificultam a disseminação das construções com terra. Pode-se ainda citar outros entraves que impedem o uso dessas tecnologias, como a ausência e/ou limitação de normas regularizadoras. As tecnologias de construção com terra crua, no Brasil, são reguladas por 10 normas que não abrangem todos os tipos de construção; o preconceito quanto ao material terra, gerado pela imagem negativa que algumas técnicas, mal empregadas, transmitem para a população; o desconhecimento e descrédito por parte dos órgãos governamentais responsáveis pelos programas de financiamento e construção; a ausência de profissionais

especializados nessas tecnologias. No Brasil, existem poucas instituições de ensino superior que tratam do assunto em sua matriz curricular; entre outros.

2.1.1. Blocos de Terra Comprimida

Os Blocos de Terra Comprimida (BTC), técnica conhecida na Europa desde o século XVIII, são produzidos pela deposição da mistura (solo-cimento) em uma fôrma e posterior prensagem (BARBOSA e GHAVAMI, 2007). A mais conhecida prensa no mundo é a CINVA Ram, desenvolvida na Colômbia pelo chileno Ramires, na década de 50 (figura 13a). As figuras 13b,c,d ilustram as etapas de assentamento dos blocos.

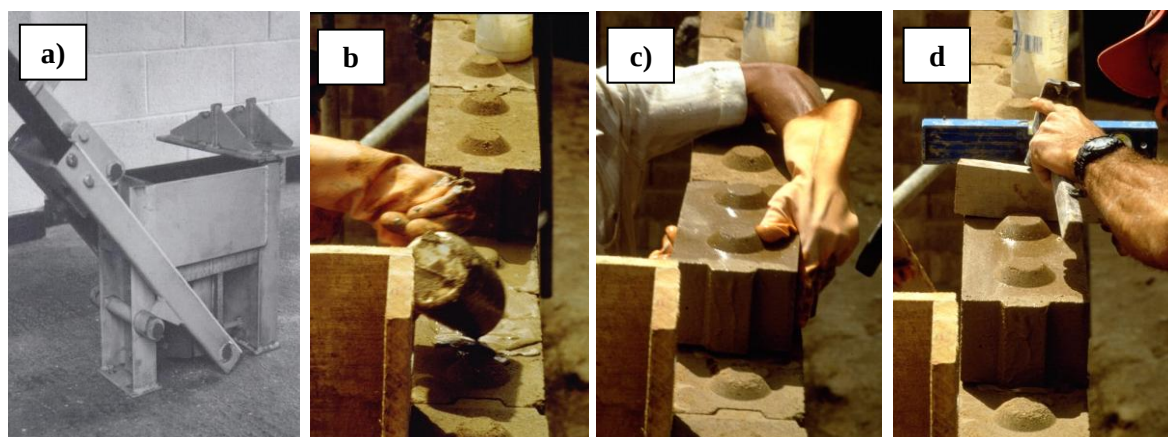


Figura 13. Máquina manual para a produção de blocos de terra comprimida e etapas de construção. a) CINVA-Ram, b) colocação da argamassa, c) assentamento do bloco, d) nivelamento e prumo. (KEEFE, 2005; BARBOSA e GHAVAMI, 2007).

Sua vantagem em relação ao adobe é que esta técnica utiliza menor proporção de água, como consequência, tem-se um menor índice de retração, além de permitir estocagem imediata. Como desvantagem, o bloco comprimido necessita ser estabilizado com cal ou cimento para que o mesmo atinja resistência adequada para construção (MINKE, 2000).

Para a produção do BTC, Barbosa et al. (1997) comentam que é necessário conhecer a distribuição granulométrica do solo, o tipo de argila presente, a porcentagem de água, além da pressão de compactação, da natureza e porcentagem de estabilizante e as condições de cura. É conveniente que o solo apresente plasticidade e que seu limite de liquidez seja menor que 45%. Quanto à

distribuição granulométrica, é desejável que o solo apresente entre 10% a 20% de argila, entre 10% a 20% de silte e 50% a 70% de areia, em peso (BARBOSA, 2003). Reddy e Gupta (2005) sugerem como mais indicados os solos arenosos que contenham predominantemente argila não expansiva (caulinita), com fração de areia menor que 65% e fração argilosa em torno de 10%. A porcentagem do estabilizante depende do tipo de solo que se vai empregar. O cimento endurece reagindo quimicamente com a água e com as partículas finas do solo. Segundo Barbosa et al. (1997), em solos argilosos é exigido no mínimo 6% de cimento, em peso de solo seco. Para solos arenosos, bem graduados, é necessário no mínimo 4% de cimento.

2.2. Durabilidade

A palavra durabilidade indica a qualidade do que é durável (duradouro), podendo ser usado no contexto da maioria dos materiais de construção, significa resistência ao enfraquecimento e desintegração ao longo do tempo (KERALI, 2001). Definições mais recentes indicam que a durabilidade pode ser considerada como a capacidade de um material para manter, as suas características distintivas e resistência ao desgaste sob condições de utilização, durante o período do serviço e tempo de vida da estrutura do qual faz parte (BAKER et al., 1991; SJOSTROM et al., 1996; GLANVILLE e NEVILLE, 1997 apud KERALI, 2001). Kerali (2001) comenta que a definição e conceito de durabilidade deve ser baseada em três parâmetros chave:

- função pretendida do material;
- as condições padronizadas de seu uso, e;
- o tempo necessário para que o material possa cumprir as suas funções.

A função pretendida do BTC é utilizá-lo como unidade de construção de alvenarias internas e externas. As características desejáveis para este elemento estrutural são: a força, estabilidade dimensional e resistência à ação de intempéries (OIT, 1987; CARROL, 1992 apud KERALI, 2001). As características iniciais de desempenho dos blocos não se mantêm constantes ao longo do tempo, e estas alterações são induzidas, principalmente, pelos efeitos da sua condição de exposição. Duras condições de uso e condições ambientais podem conduzir ao

desgaste, a fissuras, umidade e alterações dimensionais indesejáveis. Kerali (2001) comenta que, como no caso da maioria dos outros materiais de construção, os mecanismos de deterioração do BTC são variados e complexos, podendo se identificar três modos de deterioração.

- Deterioração relacionado à água;
- Deterioração relacionado à temperatura, e;
- Deterioração por agentes químicos.

2.2.1.

Deterioração relacionado à água

Os mecanismos de deterioração relacionados com a água conduz para a maioria das patologias dos blocos de terra comprimida (COOK e SPENCE, 1983). A água pode vir através da chuva, por capilaridade e condensação, e sua ação pode ser na forma de solvente e/ou ação abrasiva.

A ação solvente da água é um mecanismo de degradação muito comum, ocorrendo em muitos materiais de construção (SJOSTROM et al., 1996, apud KERALI, 2001). O BTC apresenta duas características que conduzem a essa vulnerabilidade, são elas: elevados índices de absorção de água e capacidade de retenção da água absorvida por longo período de tempo. A composição do bloco também contribui para sua vulnerabilidade. Em geral, cerca de 95% da massa do bloco é constituído por solo, e os 5% restantes por cimento. Na estabilização da matriz de solo, as reações de hidratação entre o cimento e a água, produzem, entre outros, o hidróxido de cálcio (ILLSTON, 1994 apud KERALI, 2001). O bloco é capaz de atrair a água e retê-la. O fluxo de água no BTC permite que qualquer fração de solo não estabilizado e de hidróxido de cálcio livre, possa ser dissolvido, provocando o enfraquecimento do bloco.

“A capilaridade traduz a capacidade do material saturar-se em água por forças de sucção.” (FARIA, 2004, apud ABREU, 2013). Rato (2006) afirma que a absorção inicial de água é feita por capilaridade, podendo ocorrer isoladamente ou em conjunto com a ação do vento. O autor comenta que a ascensão de água por capilaridade encontra-se intimamente ligada à estrutura porosa do material. Todos os materiais apresentam uma determinada estrutura porosa, com poros de maior ou menor dimensão, quando um material é colocado em contato com a água, os

seus poros superficiais ficam cobertos e, obedecendo ao equilíbrio hidrostático, a água é absorvida por estes até atingir o equilíbrio. Dependendo da dimensão dos poros, essa ascensão poderá ser maior ou menor em altura, sendo que, em poros de menores dimensões, a água tende a atingir alturas mais elevadas. A ocorrência da ascensão capilar dá origem a inúmeras patologias que podem ser mais graves quando acompanhada pelo transporte de sais (sulfatos, cloretos e nitratos).

Outro mecanismo comum de deterioração é a ação abrasiva na superfície do bloco provocado pela chuva (KERALI, 2001), ocorrendo com maior intensidade em regiões com chuvas frequentes e intensas, como as encontradas nas regiões tropicais. Quando a água da chuva atinge a face do BTC, a gota age retirando as partículas fracas da superfície, além de criar um ponto de erosão. É estimado que 75% da energia da gota de água é dissipada no impacto (ELLISON, 1944; GOLDSMITH et al., 1998, apud KERALI, 2001). A erosividade depende do estado das ligações das partículas da superfície do bloco, da rugosidade da superfície e das características da chuva (tamanho da gota, velocidade e forma, duração da tempestade e velocidade do vento). Este processo de degradação é irreversível e seus efeitos são facilmente observados, como desgaste da superfície e redução de volume provocados pela perda de massa. Efeitos indiretos da erosão incluem o enfraquecimento da superfície, perda da resistência à compressão, perda de rigidez, densidade e aumento da permeabilidade (KERALI, 2001).

2.2.2. Deterioração relacionado à temperatura

Os blocos de terra estão sujeitos a variações regulares de temperatura, com picos de temperatura no meio do dia, provocando dilatações e, no meio da noite, gerando contrações. Estas variações de temperatura podem causar mudanças reversíveis e irreversíveis nas propriedades físicas e químicas dos blocos, influenciando em sua durabilidade, podendo ser de duas maneiras: expansão e contração dos blocos, e; retração exógena e endógena.

A expansão e contração dos blocos, devido a variação de temperatura, é decorrente das propriedades dos materiais que o compõe (HOUBEN e GUILLAUD, 1994). A deterioração é resultado da tensão induzida no bloco. Em altas temperaturas, um bloco pode facilmente se expandir, porém, esta expansão

pode ser restringida por outros blocos, bem como pela argamassa de assentamento. A expansão do bloco pode gerar significantes tensões internas (compressão e tração). Como os blocos são possuem boa resistência à tração, podem ocorrer o aparecimento de fissuras, que facilitam a entrada de umidade no bloco. Durante a noite ocorre o inverso, contrações ocorrem provocando tensões internas e possíveis fissuras. A ocorrência contínua e cíclica de expansão e contração pode acelerar o processo de degradação do bloco (TORRACA, 1988 apud KERALI, 2001).

A retração por secagem do BTC está associada com as temperaturas elevadas do ambiente. Essas temperaturas elevadas podem causar alterações dimensionais no bloco, resultando numa redução do seu volume. As tensões internas provocadas por essa retração podem criar e/ou aumentar o número de fissuras. SALES (2006) comenta que a retração em misturas à base de cimento é, principalmente, um conjunto de efeitos do complexo sistema de secagem, e pode-se dar tanto por perda de água para o meio externo, podendo ser chamada de secagem exógena, quanto por adsorção da água para formação de produtos de hidratação do cimento, a secagem endógena. Kerali (2001) explica que para o BTC existem dois mecanismos diferentes de retração, o primeiro é decorrente da saída da água através dos poros capilares e o segundo é provocado pela saída da água presente na fração argila e endurecimento da pasta de cimento. O autor comenta que a deterioração relacionada com a temperatura no BTC afeta as seguintes propriedades do bloco: forma, dimensões, resistência, dureza, rigidez, permeabilidade, fragilidade e aparência.

2.2.3. Deterioração relacionado à agentes químicos

A deterioração do BTC pode também ocorrer por efeitos da atividade química. Os blocos são compostos, em geral, por solo (95%) e o restante por cimento (5%). Este solo contém grandes quantidades de minerais e contaminantes (LUNT, 1980, apud KERALI, 2001), algumas dessas substâncias podem permanecer dormentes e estáveis quando não estão em contato ativo com elementos ambientais (água da chuva, altas temperaturas, umidade relativa do ar, gases), contrário ao solo, o cimento Portland apresenta grandes quantidades de

substâncias químicas instáveis. A presença de umidade e variação de temperatura podem iniciar um processo de deterioração química, os mecanismos de degradação podem ser: lixiviação (argila e hidróxido de cálcio); formação de produtos expansivos (capazes de gerar grandes tensões internas), e; decomposição direta (pasta de cimento).

A lixiviação é um fenômeno que envolve a lavagem de substâncias solúveis (JACKSON e DHIR, 1996, apud KERALI, 2001). As substâncias solúveis presentes no BTC, são o hidróxido de cálcio e a fração de argila não estabilizadas ou parcialmente estabilizada (HOUBEN e GUILLAUD, 1994).

Segundo Neville (1995 apud KERALI, 2001), o hidróxido de cálcio é conhecido por facilmente se dissolver em água. O processo de dissolução é irreversível e possui como catalisador as temperaturas elevadas e a presença de dióxido de carbono, assim, o hidróxido de cálcio pode ser removido pelo fluxo de água no BTC (absorção por capilaridade). O fenômeno da lixiviação do hidróxido de cálcio também é citado em trabalhos de concreto, não há nenhuma razão justificável, esperar que ocorrências semelhantes não aconteçam ao BTC (KERALI, 2001).

Argilas não estabilizadas são facilmente encontradas em BTC (HOUBEN e GUILLAUD, 1994). Devido à sua finura e área de superfície específica elevada, o argilomineral pode impedir o processo de estabilização do aglomerante, como absorver a água para a hidratação do cimento. A argila pode também estar presente na superfície das frações de areia, inibindo a ligação do cimento com estas partículas (KERALI, 2001). Dependendo do tipo de argilomineral presente, existe uma relação diferente com a água. Argilas do tipo caulinita são mais estáveis em água, em contraposição, o grupo das esmectitas absorvem e perdem água com grande facilidade (HOUBEN e GUILLAUD, 1994). O inchamento do argilomineral é conhecido por auxiliar no mecanismo de dispersão. Argila dispersa num bloco pode ser facilmente retirada através do fluxo de água nos poros e capilares do BTC.

O efeito combinado da lixiviação do hidróxido de cálcio e da argila não estabilizada, podem provocar o aumento da porosidade de um material (NEVILLE, 1995 apud KERALI, 2001). O aumento da porosidade combinado com a ação da água (absorção e capilaridade) tornam o bloco mais vulnerável ao enfraquecimento de sua superfície com redução de volume provocados pela perda

de massa, propiciando a perda da resistência a compressão, rigidez, densidade e aumento da permeabilidade.

A formação de produtos expansivos ocorrem pela presença de sais solúveis higroscópios, entre eles: cloretos, sulfatos e nitratos. Os sais reagem com a água e os produtos de hidratação do cimento se cristalizando, na superfície ou no interior do elemento de construção, provocando eflorescências ou criptoflorescências (KEEFE, 2005), essa reação provoca ruptura e desagregação do material, uma vez que, os sais aumentam de volume (expandem), gerando a diminuição da resistência mecânica do material, o aumento de microfissura (microcanais) de penetração de água e infiltração por absorção capilar (IPHAN, 2000).

2.3. Estabilização do Solo

A estabilização do solo compreende todos os processos naturais e artificiais que objetivam melhorar características como resistência, durabilidade, e outras, bem como garantir a manutenção destas melhorias no tempo de vida útil das obras de Engenharia. Houben e Guillaud (1994) definem que a estabilização implica na modificação das propriedades solo-água, obtendo propriedades duradouras compatíveis com uma aplicação particular. Conforme Inglês e Metcalf (1972, apud SILVA, 2007), os princípios que regem a estabilização dos solos tendem a conferir ao produto final uma melhor estabilidade dimensional, aumento de resistência mecânica para patamares definidos pela utilização, diminuição da permeabilidade, controle da fissuração por retração devido à secagem, resistência à erosão e abrasão superficial e, consequentemente, aumento da durabilidade do material.

A estabilização é um problema complexo, com número considerável de parâmetros envolvidos, como as propriedades do solo, a melhoria que se deseja realizar, os custos que envolvem a estabilização, a técnica construtiva, o sistema de construção adotado, a interação fibra-matriz no caso de solos reforçados, além de custos para sua manutenção. A estabilização pode ser do tipo mecânico, físico, químico, elétrico ou térmico.

O uso de produtos e processos de estabilização em construções de terra, com o intuito de melhorar sua resistência e durabilidade, é antigo. Talvez um dos materiais pioneiros utilizados no Brasil, com esta finalidade, foi o óleo de baleia. Embora exista uma crença sólida de que o óleo garante a resistência da argamassa

de cal na construção colonial, Katinski (1994, apud PARDAL, 2010) afirma não haver comprovação de sua eficácia, nem na experiência, muito menos na literatura especializada. Alguns pesquisadores julgam que não se utilizava o óleo (utilizado principalmente para iluminação), mas sua borra (resíduo do cozimento da gordura da baleia). Segundo transcrição de Vieira (1920, apud PARDAL, 2010) “*os antigos construtores serviam-se dessa borra (gala-gala) ligada à cal do Reino para as edificações, e é por isso que nas demolições de antigos edifícios é preciso muitas vezes empregar a dinamite*”. Contudo, em algumas especificações de obras dos séculos XVI a XIX, vê-se que o óleo era indicado para construções que estavam em contato com água (obras próximas ao mar).

Quanto ao real uso do óleo de baleia, existe ainda outra teoria. Sendo a comercialização do óleo (material combustível) uma das principais atividades econômicas da época, não seria equivocado admitir que o capital gerado pela venda do óleo fosse investido em construções residenciais e comerciais, aquecendo o mercado imobiliário. Assim, não seria errôneo afirmar que estas construções foram feitas com óleo de baleia (construídas com a comercialização do óleo). Se o óleo de baleia foi certamente usado, como material aglutinante ou somente como hidrorrepelente, fica a dúvida se foi utilizado na forma pura, sob a forma residual (borra), ou sob ambas as formas (PARDAL, 2010).

Os solos dos cupinzeiros também demonstram ser adequados para a construção com terra, registros indicam seu uso na agricultura desde tempos remotos, melhorando o pH do solo incluindo o aumento da quantidade de matéria orgânica e nutrientes. Na Engenharia Civil e Arquitetura, o solo do cupinzeiro melhora as propriedades mecânicas, apresentando maior plasticidade quando comparado a argila comum (ALBUQUERQUE et al., 2008).

Millogo et al. (2011) investigaram a mineralogia, as características microestruturais e físicas (granulometria, limites de Atterberg, porosidade, retração, resistência a compressão e flexão) do solo de cupinzeiros, constatando que a porosidade e resistência mecânica do solo são comparáveis à resistência de solos para uso em construções com terra (adobe). Nas comparações entre a resistência mecânica, observaram que o solo dos cupinzeiros são tão resistentes, quanto os solos estabilizados com cimento. Na avaliação, a retração linear foi menor que 5%. Esta limitada retração deve-se à presença significativa de filler (principalmente quartzo) e pela ausência de argilominerais expansivos.

Vertamatti (1986, apud ROLIM, 1999) avaliou a impermeabilidade do solo tratado com cal, ácido fosfórico e um composto sintético baseado na baba do cupim (DS-328), na estabilização de solos finos da Amazônia. Corpos de prova cúbicos (50 x 50 mm) foram moldados e ensaiados. O autor verificou melhorias na impermeabilização somente dos compósitos estabilizados com DS-328.

Vaillant (1995) estudou os efeitos da adição do DS-328 em matrizes de terra, em dosagens e energia de compactação variada. O autor observou que nos parâmetros de compactação (teor de umidade e massa específica aparente seca) não houve alterações significativas, concluindo que o aumento da resistência se deve principalmente ao tipo de solo, ao tipo de aglomerante adicionado (cimento, cal, etc) e ao tempo de cura.

Quanto ao uso de resíduos agrícolas, Achenza e Fenu (2006) utilizaram o resíduo da beterraba e tomate obtidos na produção de açúcar e suco de tomate, respectivamente. Os autores observaram a redução da porosidade dos corpos de prova, constatando a modificação das dimensões dos poros, tornando-os menores. Testes de imersão demonstraram que o solo estabilizado permaneceu estável após 8 dias, ao contrário dos corpos de prova de referência, que se desagregaram rapidamente. Nos ensaios de absorção por capilaridade, o solo não estabilizado saturaram em 1 dia e 5 horas, enquanto os espécimes estabilizados com polímeros demoraram 10 dias. Quanto à resistência mecânica, os autores demonstraram o aumento significativo da resistência à compressão simples (75%) em comparação aos corpos de prova não estabilizados.

No uso de materiais poliméricos sintéticos na estabilização de matrizes de terra, Atzeni et al. (2008) utilizaram como estabilizante dois tipos de cimento hidráulico, a cal hidratada e dois polímeros (látex acrílico e uma solução de naftaleno sulfonato). Os resultados demonstraram um aumento da retração para os estabilizantes orgânicos, porém um acréscimo na resistência à compressão simples. Os autores concluíram que contrariamente ao que é assumido, a utilização de cimento e cal melhoraram a estabilidade dimensional dos elementos, porém não melhoraram sua resistência mecânica e os estabilizantes poliméricos melhoraram a resistência a abrasão em comparação aos estabilizantes hidráulicos, em decorrência de resistirem melhor à abrasão.

Gutiérrez e Jimenez (2010) adicionaram mucilagem da Palma (*Opuntia ficus-indica*) e pneu triturado em BTC. Os espécimes foram moldados com solo,

cimento, pneu triturado (5-20%) e solução aquosa de palma (0-50%). Os resultados indicam que os corpos de prova com adição de 30% de concentração de mucilagem apresentam melhor resistência à compressão simples em comparação aos exemplares de referência. Quanto à durabilidade, observou-se a redução nos índices de absorção d'água dos espécimes com adição de palma, redução de 5,83% e 4,1% para adições de 10% e 15%, respectivamente. Os autores notaram um aumento de 14,97% na resistência à compressão simples dos corpos de prova com adição de 15% de pneu.

Estes exemplos demonstram a variedade de aglomerantes utilizados na estabilização do solo. Para a utilização em construções de ambiências rurais ou moradias habitacionais, o solo estabilizado deve resistir às solicitações empregadas e à ações de intempéries. Uma breve descrição será feita sobre a estabilização mecânica, a física e a química, por serem utilizadas de forma mais corrente, e por fazerem parte do escopo desta pesquisa.

2.4.

Estabilização Mecânica

Na estabilização mecânica, as melhorias no comportamento do solo originam-se de mudanças em seu sistema trifásico (grão/água/ar) através da aplicação de carregamento (compactação), podendo ser de natureza estática, quasi-estática e/ou dinâmica. O método de estabilização aumenta a densidade do solo, melhorando sua resistência e durabilidade pela redução dos vazios da mistura. A redução dos poros também inibe a percolação da água e a erosão provocada pela mesma (HOUBEN e GUILLAUD, 1994). O grau de compactação, no entanto, é influenciado pelo tipo de solo, o teor de umidade durante a compactação e o esforço de compressão aplicado (TADEGE, 2007).

Proctor, em 1933, apresentou estudos que fundamentaram um dos mais importantes princípios da Mecânica dos Solos, estabelecendo que a densidade de um solo depende da quantidade de água durante o processo de compactação. Para uma mesma energia de compactação, ao ser adicionada água ao solo, observa-se o crescimento da densidade seca até certo ponto, denominado de ponto de “umidade ótima”. A partir da umidade ótima, a água adicionada proporciona o decréscimo

da densidade seca, pois o excesso de água finda por absorver a energia de compactação, alterando a estrutura do solo (GRANDE, 2003).

A busca por métodos de ensaios capazes de representar, em laboratório, as condições de campo, tem motivado pesquisadores a testar outros métodos para obtenção do teor de umidade ótima dos solos. Reddy e Gupta (2005) afirmam que as máquinas manuais utilizadas para a produção do BTC, através de sistemas de alavanca, aplicam um carregamento quasi-estático, então a densidade seca máxima e a umidade ótima do solo não podem ser baseadas somente pelo ensaio de Proctor. Barbosa et al. (1997) indicam que pequenas variações na umidade de moldagem podem conduzir a significativas mudanças na densidade seca máxima e, conseqüentemente, na resistência de blocos de terra, ratificando que o ideal é que se use a umidade ótima determinada pelo ensaio de compactação quasi-estática.

Mesbah et al. (1999) demonstraram um método de compactação quasi-estático, que permite a avaliação da umidade ótima, entre outros parâmetros, em substituição ao ensaio de Proctor, para a manufatura de blocos de terra. O método de produção de corpos de prova sugere a moldagem de amostras cilíndricas, capazes de serem ensaiadas por procedimentos comuns a espécimes de argamassa e concreto, a exemplo dos ensaios de compressão simples e compressão diametral, além dos modelos serem representativos de blocos de terra comprimida.

2.5.

Estabilização Química

A estabilização química dos solos refere-se às alterações produzidas em sua massa pela introdução de uma quantidade de aglomerantes. Quando utilizada para solos arenosos visa principalmente melhorar sua resistência ao cisalhamento (causado pelo atrito produzido pelo contato das superfícies das partículas) por meio de adição de pequenas quantidades de ligantes nos pontos de contato dos grãos (HOUBEN e GUILLAUD, 1994). Dentre os aglomerantes, cita-se o cimento Portland, cal, materiais betuminosos e certas resinas.

O estabilizante químico mais utilizado é o cimento Portland, sua ação no solo se dá precisamente da mesma maneira que no concreto. A reação com a água forma um gel coloidal cimentício insolúvel, capaz de dispersar-se e preencher os

poros, endurecendo para formar uma matriz contínua de melhor resistência, que envolve as partículas de solo, unindo-as (COOK e SPENCE, 1983).

Uma outra forma de estabilização química é a adição de minerais denominados pozolanas. Estas adições minerais possuem alguma sílica e alumínio em forma amorfa que, na presença da água, podem combinar-se quimicamente com a cal, para formar compostos semelhantes aos silicatos e aluminatos de cálcio hidratado. Cimentos alternativos, como apontado por Savastano (2001), podem ser adequados para substituir, em parte ou totalmente, o cimento Portland, trazendo como vantagem a diminuição dos processo de extração dos minérios (calcário e argila) para produção do clínquer (produto base do cimento), promovendo economia energética e, conseqüentemente, redução de custos de produção, além de destinar uma imensa quantidade destes rejeitos industriais e agroindustriais. Cabe mencionar que, para a utilização destes resíduos no solo, é necessário que haja quantidade de cal disponível na mistura para que as reações de estabilização aconteçam. Dessa maneira, se faz necessária a adição complementar de cimento ou cal.

Os benefícios obtidos na adição de pozolanas são conhecidos pelos gregos desde 400 a.C. e, subsequentemente, pelos romanos. É interessante notar que o desenvolvimento do cimento hidráulico se baseia na mistura de cal e pozolanas, e conduziu a mudanças radicais durante a era de construção romana. O aumento da resistência das misturas cal e pozolanas, das suas propriedades hidráulicas e a boa resistência à água do mar, permitiram, não só a construção de arcos, cúpulas e demais estruturas marinhas, mas também de tanques e aquedutos (COOK e SPENCE, 1983).

Segundo Papadikis e Venuat (1968, apud SOUZA e DAL MOLIN, 2002), os romanos utilizavam um material pozolânico proveniente da moagem de telhas e de tijolos cerâmicos, em locais onde não havia a disponibilidade de cinzas vulcânicas. Para que a argila caulinítica possa desenvolver a atividade pozolânica, existe a necessidade que a mesma sofra processo de calcinação, em temperaturas entre 500 e 800°C, e posterior moagem, visando diminuir sua granulometria. Tem-se uma excelente atividade pozolânica, quando o processo de moagem reduz o tamanho das partículas a valores inferiores a 5µm. Esta nova configuração é denominada, por alguns autores, como metacaulim de alta reatividade (MCAR).

Nóbrega et al. (2005) estudou a utilização da mistura cal-caulim calcinado e cal-metacaulim em argamassas, analisando a resistência a compressão da mistura aos 7 e 28 dias. Os estudos demonstraram que a melhor proporção da mistura é obtida em 50%-50%. Observou-se, também, o aumento dos tempos de início e final de pega. Os autores verificaram a queda da resistência a compressão com o aumento da proporção em peso de areia (1:3 para 1:7) e concluíram que a utilização deste tipo de estabilizante em substituição ao cimento não foi suficiente para atingir valores de resistência à compressão do cimento Portland.

A casca de arroz é o resíduo vegetal que mais produz cinzas quando queimada. Essas cinzas, por serem compostas basicamente de sílica, podem ser utilizadas como matéria-prima na elaboração de diversos materiais, em diferentes ramos industriais, tais como o da construção civil, da cerâmica e do vidro. Como a cinza contém alto teor de sílica (> 92%), isto a torna um resíduo valorizado. No entanto, essa cinza só terá alto valor econômico, se possuir alta qualidade, que é mensurada pela alta superfície específica, tamanho e pureza da partícula. A sílica é uma combinação de silício e oxigênio na forma SiO_2 . A cinza da casca de arroz (CCA) pode conter até 15% em peso de carbono. Se o aquecimento for promovido com a finalidade de eliminar este carbono residual, pode-se obter aproximadamente 95% de sílica pura com partículas com um tamanho em torno de 20 μm , gerando assim um produto de maior valor agregado (JAUBERTHIE et al., 2000).

Prudêncio et al. (2003) comparou a reatividade química das diferentes CCA com a reatividade química da sílica ativa e da cinza volante, utilizadas como padrões de referência. Foi possível observar que: as cinzas de casca de arroz apresentaram maior reatividade que as outras pozolanas estudadas; a reatividade química das cinzas aumentava com a diminuição do teor de carbono nelas presentes, e o material obtido poderia ser utilizado, com vistas à produção de concretos e argamassas, à base de cimento Portland.

Sugita et al. (1999), estudando a cinza da casca do arroz, concluiu que este é um resíduo de comprovada atividade pozolânica e que o mesmo pode melhorar a resistência do compósito, além de inibir qualquer ataque ácido e carbonatação. Isso pelo fato da CCA permitir a formação de C-S-H gel e reduzir a quantidade de portlandita, devido a sua reação com Ca(OH)_2 , subproduto da hidratação do cimento Portland.

Paula et al. (2009) avaliaram, através de ensaios físicos e mecânicos, o uso da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial do cimento. Os índices de atividade pozolânica comprovaram a reatividade do resíduo. Do ponto de vista da resistência à compressão, argamassas com teores entre 0 e 30% indicaram a possibilidade de substituição de até 20% do cimento pela cinza, sem prejuízo à resistência.

Freitas (1996 apud VALENCIANO, 1999) estudou as cinzas resultantes da queima do bagaço de cana em mistura com solo-cimento, visando à obtenção de tijolos para uso em construção civil. Os tijolos foram confeccionados com traços 1:0:12, 1:1:11, 1:2:10, 1:3:9 e 1:4:8 (cimento, cinza e solo), em volume. A autora observa que a adição de cinza foi satisfatória em todos os traços estudados, atentando ao fato de que a adição excessiva de cinza no solo provoca decréscimos nas propriedades mecânicas do material.

Silva e Akasaki (2000) utilizaram a casca de arroz, o pó de serra e o bagaço de cana-de-açúcar (5, 15 e 30%) na produção de blocos de terra, tendo como objetivo encontrar os teores máximos de resíduos a serem incorporados sem o comprometimento das qualidades mecânicas do tijolo. Os resíduos passaram por tratamento de lavagem em água quente e o teor de cal foi de 10%. Os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de resistência à compressão simples e absorção de água. Os resultados demonstraram que a introdução de resíduos agroindustriais nos tijolos de solo-cal afeta negativamente suas propriedades mecânicas. Os autores observaram o decréscimo da resistência à compressão simples e um aumento da taxa de absorção de água.

Valenciano (1999) empregou cinzas de bagaço de cana-de-açúcar na produção de argamassas e estabilização de solo. A autora observou uma acentuada redução na resistência à compressão simples, provavelmente devido a baixa atividade pozolânica associada às condições de calcinação, contudo, não foram realizados ensaios para medição da atividade pozolânica da cinza.

2.5.1 Cimento

O estabilizante químico mais utilizado na produção do BTC é o cimento. Handy (1958, apud GRANDE, 2003) e Cook e Spence (1983) também observaram a formação de um gel coloidal, descrevendo que na interface do grão de solo ocorre uma combinação de ligações mecânicas com as superfícies minerais, que apresentam certa rugosidade, somadas às ligações químicas dessa interface. Quando ocorre a formação do CH, os íons de cálcio encontram-se disponíveis na mistura e estes se associam à superfície dos argilominerais que possuem capacidade de troca de cátions. A troca de cátions dos argilominerais presentes por íons de cálcio provenientes da hidratação do cimento torna o solo mais granular, a adesividade é reduzida e a sensibilidade à variação de umidade e variação volumétrica se tornam menores (MILANI, 2005).

Walker (1995) observou o decréscimo da resistência à compressão simples e aumento do índice de plasticidade, concomitante a redução da quantidade de cimento. A redução da resistência, devido à presença de argila, foi mais evidente em solos com plasticidade entre 15% e 25%. Embora o cimento reaja, estabilizando minerais argilosos, a resistência da estrutura coloidal/cimento é significativamente mais fraca do que a estrutura granular/cimento.

Em Bahar et al. (2004) e Kenai et al. (2006), a adição de cimento, em matrizes de solo, reduziu sua permeabilidade. Isto demonstra que a estabilização química conduz a uma melhor resistência mecânica e menor permeabilidade, proporcionando uma maior durabilidade. Os autores ainda observaram um significativo decréscimo da retração, entre 20 e 44%, para solos estabilizados com 6 e 10% de cimento, respectivamente.

Pinto (2008), analisando a influência da estabilização química nas matrizes de solo, observou o expressivo acréscimo de rigidez e resistência final conforme houve a adição de cimento. Os espécimes argilosos, em estado seco, apresentaram resistências últimas superiores aos arenosos, porém, em condição saturada, o comportamento foi inverso. A redução de resistência para as matrizes argilosas foi de aproximadamente 58%, compósitos arenosos reduziram em torno de 30% e compósitos fibrosos (matrizes argilosas e arenosas) tiveram uma redução com índices médios de 40%. Os dados indicaram que matrizes arenosas, estabilizadas

com cimento, se comportaram mais satisfatoriamente à ação da água que as matrizes argilosas, por sofrer menor influência da saturação.

2.5.2

Polímero - Acetato de Polivinila (PVA)

Acetato de polivinila (PVA) é um polímero sintético, preparado pela polimerização do acetato de vinila. O PVA é vendido como uma emulsão em água, como um adesivo para materiais porosos como madeira, papel, tecido e cerâmicas. O uso do PVA já tem sido documentado como uma solução eficaz para a estabilização de solo, principalmente contra agentes erosivos, como o vento e a chuva.

O uso do PVA para estabilização de solo para a agricultura foi tema de estudo de Carr e Greenland (1975). Emulsões de PVA foram adicionadas em frações de 0.03 e 0.12%, por peso, em um solo arenoso. O tratamento com as emulsões aumentaram a estabilidade dos agregados, melhorando a firmeza das espécies vegetais plantadas (erva castelhana, tomate e cevada).

Gabriels e Boodt (1975) estudaram a redução da erosão de solo tratado com emulsões poliméricas (Poliacrilamida, PVA e emulsão asfáltica). O tratamento foi aplicado por dispersão das emulsões sobre o solo siltoso. Ensaio de simulação de chuva (rainfall), aplicado por 1 hora, avaliaram a resistência à ação da água das superfícies tratadas. Em todos os casos estudados, observou-se a redução da erosão.

Siddiqi e Moore (1981) estudaram a aplicação de resinas poliméricas em solos não coesivos, com o objetivo de aumentar sua resistência a erosão, causada pelo vento e água. A resistência a erosão, compressão simples e permeabilidade foram analisadas. O solo que recebeu o tratamento com PVA demonstrou-se sensível à ação da água, não apresentando uma boa performance em comparação aos outros polímeros.

Kukul et al. (2007) avaliaram os efeitos da adição de PVA para a redução da erosão de tipos de solo arenosos distintos (solo erodido, floresta, agricultura e gramado). O ensaio para determinação da durabilidade foi o de gotejamento. Os autores observaram que a estabilidade ao gotejamento foi menor em solos erodidos, seguido por solos de agricultura, floresta e gramado, constatando,

também, que os agregados menores são mais estáveis que os maiores. A estabilidade ao gotejamento de solos com agregados entre 2-5 e 5-10 mm, aumentou 40% com adições 0,05% de PVA. A adição de 0,1 e 0,2% de PVA aumentou a resistência ao gotejamento entre 71-73% e 87-88%, respectivamente.

Rolim (1999) avaliou a resistência mecânica (compressão simples e compressão diametral) e durabilidade (ciclos alternados de molhamento e secagem) de compósitos solo, cal e “água-de-cola”. A “água-de-cola” é um resíduo resultante da fabricação da cola-branca (PVA). Dois tipos de solo (argiloso e arenoso) foram tratados com 8% e 15% de “água-de-cola” concentrada a 5 e 10%, além da adição de 3% de cal. Os resultados indicam que o tratamento do solo unicamente com “água-de-cola” afetou negativamente o tempo de pega, a resistência à compressão simples, à compressão diametral e a capacidade de suporte do solo. A adição de 3% de cal aos solos, resultou em acréscimos da resistência à compressão simples e do índice CBR-Adaptado, com o aumento do tempo de pega.

O uso do látex, aplicado em concretos estruturais com agregados reciclados, foi estudado por Ballista (2003). O autor observou resistência mecânica equivalente aos concretos contendo agregados naturais e com bom desempenho em ambientes agressivos e aderência aço-concreto também semelhantes, demonstrando a potencialidade do uso deste polímero, em matrizes cimentícias.

Ferreira e Moreno (2011) estudaram a aplicação do PVA como cola para assentamentos de tijolos maciços de solo-cimento. Os autores observaram que o acetato de polivinila (PVA) provoca alterações nas propriedades da argamassa fresca e endurecida, proporcionando boa plasticidade, aumento da coesão, diminuição do módulo de elasticidade, aumento da resistência de aderência e diminuição da absorção de água, além de aumentar, de duas a três vezes, a capacidade de deformação na flexão.

2.5.3.

Polímero - Resina Poliuretana de Mamona (RPM)

As resinas poliuretanas podem ser derivadas tanto do petróleo como de fontes renováveis, como os óleos vegetais. Estes óleos podem ser derivados de vegetais, como a soja, milho, açafrão, girassol, canola, amendoim, mamona e

outros, como afirma Petrovic (1999, apud SILVA, 2003). O óleo de mamona é obtido de sua semente, encontrada nas regiões de clima tropical e subtropical, sendo abundante no Brasil. O desenvolvimento das resinas baseadas neste óleo, teve origem em meados da década de 1940, segundo Vilar (1993, apud SILVA, 2003). O uso da mamona não é novo, registros indicam que este fruto já era usado pelos egípcios há pelo menos 4000 anos. Na Grécia antiga, escritos descrevem o emprego do óleo para iluminação e produção de unguentos. No Brasil, a planta foi trazida pelos portugueses com a finalidade de utilizar o seu óleo como combustível.

A mamona é uma espécie vegetal comum em regiões de clima tropical e sua semente é o seu constituinte principal (Figura 14a). A produção brasileira do óleo de mamona se concentra na região Nordeste, sendo a Bahia o principal produtor, com 85% da produção nacional (QUIMICA NOVA, 2010).

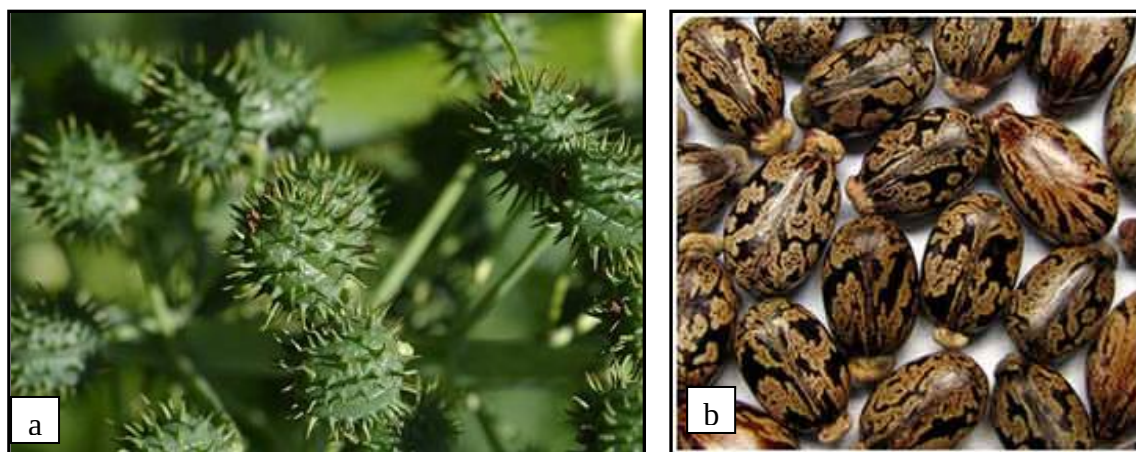


Figura 14. (a) Fruto da mamoneira; (b) sementes de mamona (QUIMICA NOVA, 2010)

A mamona é classificada botanicamente pelo nome científico *Ricinus communis*, pertencente ao gênero *Euphorbia*, família *Euphobiaceae*, classe *Dicotyledonea*, ordem *Geraneácea*, propaga-se através de sementes. Sua semente é capsular ovóide, achatado, de tamanho variável, com superfície lisa, brilhante e acinzentada, cujo componente mais abundante é o ácido ricinoleico, conforme ilustrado na figura 14b (FERREIRA, 1986, apud RODRIGUES, 2005).

Segundo Vilar (2002), o teor de óleo das sementes de mamona varia em torno de 35 a 55%, sendo o principal ácido graxo da mamona o ácido ricinoléico, caracterizando-se por sua alta massa molar (928 g/mol) e baixo ponto de fusão. A

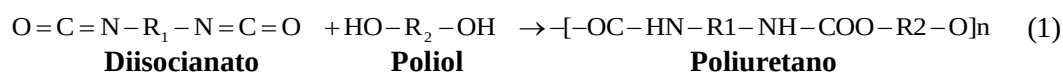
composição média do teor de ácidos graxos no óleo de mamona é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição do óleo de mamona (Valores médios em %).

Composição	Valores médios (%)	
	Moahkin (1986, apud QUIMICA NOVA, 2010)	Silvestre Filho (2001, apud RODRIGUES, 2005)
Ácido ricinoléico	84,0-91,0	89,5
Ácido palmítico	0,9-1,5	1,0
Ácido linoléico	2,9-6,5	4,2
Ácido linolênico	--	0,3
Ácido dihidroxiesteárico	1,4-2,1	0,7
Ácido oléico	3,1-5,9	3,0
Ácido eicosanóico	--	0,3

O óleo de mamona é aplicado em diversos segmentos da indústria, dentre os quais, tintas e isolantes, cosméticos, produtos farmacêuticos, corantes, desinfetantes, bactericidas, fungicidas, óleos lubrificantes, colas especiais e adesivos, etc.

Poliuretano (denominado pela sigla PU) é um polímero que compreende uma cadeia de unidades orgânicas unidas por ligações uretânicas. A polimerização dos uretanos ocorre quando se faz reagir uma substância - com dois ou mais isocianatos - com um álcool polifuncional, ou seja, um poliol (QUIMICA NOVA, 2009), conforme demonstrado na equação 1.



A obtenção de poliuretanas a partir de outras fontes vegetais foi tema de estudo de Lopes (2009), que caracterizou e preparou poliuretanas do óleo de linhaça (*Linum usitatissimum* L.) e maracujá (*Passiflora edulis* Sims f. *flavicarpa* Degener). Os resultados indicaram a potencialidade dos óleos estudados na síntese de poliuretanos.

Almeida e Ferreira (2006) avaliaram a aplicação da resina poliuretânica derivada do óleo de mamona como revestimento polimérico para substratos de concreto na construção civil. As propriedades mecânicas e viscoelásticas foram estudadas. Os autores concluíram que o intemperismo artificial não ocasionou mudanças significativas nas propriedades do revestimento polimérico, para o tempo de exposição analisado.

Silva et al. (2000) avaliaram as propriedades mecânicas de compósitos formados por resina poliuretânica e fibras curtas de sisal distribuídas aleatoriamente. Os compósitos foram feitos com moldagem por compressão, utilizando-se fibras de sisal sem tratamento e, também, fibras tratadas com hidróxido de sódio (10%). Os autores observaram um acréscimo gradual das propriedades mecânicas, em tração e em flexão, com o aumento da fração volumétrica de fibras.

O uso do RPM na produção de chapas aglomeradas de bambu foi estudado por Januário (2006). A espécie de bambu escolhida para a pesquisa foi a *Bambusa vulgaris*. As chapas apresentaram espessura inferior a 2,4 mm, com 5%, 10% e 15% de resina em relação à massa de bambu. Os corpos-de-prova foram submetidos a ensaios físicos (controle de espessura, densidade, absorção de água e inchamento) e mecânicos (arrancamento de parafuso da superfície e do topo, dureza Janka, compressão longitudinal, flexão estática e tração perpendicular). Os resultados demonstram que o teor de 10% de resina não diferiu estatisticamente do teor de 15%, sendo ambos superiores ao teor de 5%.

Carvalho e Calil Junior (2009) analisaram as propriedades mecânicas de compósitos de tecidos trançados com fibras de sisal. Duas resinas foram estudadas (RPM e resina epóxi). Os resultados obtidos indicaram desempenho mecânico compatível entre as duas resinas, atentando para a necessidade de otimizar o processo de impregnação.

2.6.

Estabilização Física

Na estabilização física, as propriedades do solo são alteradas modificando-se sua textura. Este método consiste basicamente no emprego de um ou mais materiais, de modo a se enquadrarem dentro de uma determinada especificação, como, por exemplo, a correção granulométrica ou a adição de fibras (metálicas, minerais, sintéticas ou vegetais). Desta combinação de materiais, surge um terceiro produto que agrega as propriedades de suas fases constituintes. A este novo material dá-se o nome de material compósito. Muitos compósitos têm sido criados para prover a combinação de características mecânicas como rigidez, tenacidade e resistência a altas temperaturas, entre outros (SALES, 2006). Em

geral, materiais compósitos são formados por duas fases, a primeira delas denominada de fase matriz, a qual agrega a segunda fase, chamada de dispersiva. A interação entre as fases governará as propriedades dos materiais compósitos, que por sua vez, é influenciada por características físicas e químicas das fases constituintes.

As dimensões continentais do território brasileiro, associadas aos diferentes tipos de clima, relevo e solo, asseguram a presença de uma riquíssima vegetação. Assim, o uso de fibras naturais de origem vegetal é uma excelente alternativa para o reforço de materiais compósitos, em razão da enorme variedade de plantas e frutos fibrosos disponíveis na biodiversidade. Embora existam registros da inserção de reforço fibroso em elementos de terra no Antigo Egito e em Roma (AGOPYAN, 1991), pesquisas podem ser consideradas como escassas e ainda pouco se conhece sobre seus efeitos, em decorrência da variabilidade dos solos e fibras.

No caso de fibras vegetais, o que se chama habitualmente de fibra é um conjunto de filamentos individuais, formadas por fibrilas e unidas por espécies químicas orgânicas não cristalinas, as ligninas e as hemiceluloses. As fibrilas se orientam em ângulos distintos, unindo-se e formando as diversas camadas que compõem a macrofibra. Assim, e de forma simplificada, a celulose é um polímero natural que reforça o material, a cadeia de celulose forma microfibrilas que, juntamente com a hemicelulose, formam as fibrilas. As fibrilas são assentadas em várias camadas para construir a estrutura da fibra. As fibras são unidas dentro da planta por lignina (ARSÈNE et al., 2003). A estrutura de uma microfibra vegetal é ilustrada na figura 15. Nesse esquema, vê-se a parede primária (P), com cerca de 0,05 μm de espessura. A parede secundária é formada por três camadas distintas, caracterizadas por diferentes alinhamentos das fibrilas. A camada S1 tem entre 0,1 μm e 0,2 μm de espessura, a camada S2 tem de 2 μm a 10 μm de espessura e a camada S3, mais interna, tem cerca de 0,1 μm de espessura (SMOOK, 1989). Na região central, uma cavidade denominada lúmen é grande responsável pela elevada absorção de água e baixa massa específica aparente (GRAM, 1983 apud PICANÇO, 2005). Na tabela 2 estão descritas algumas das características físicas e mecânicas de algumas fibras vegetais.

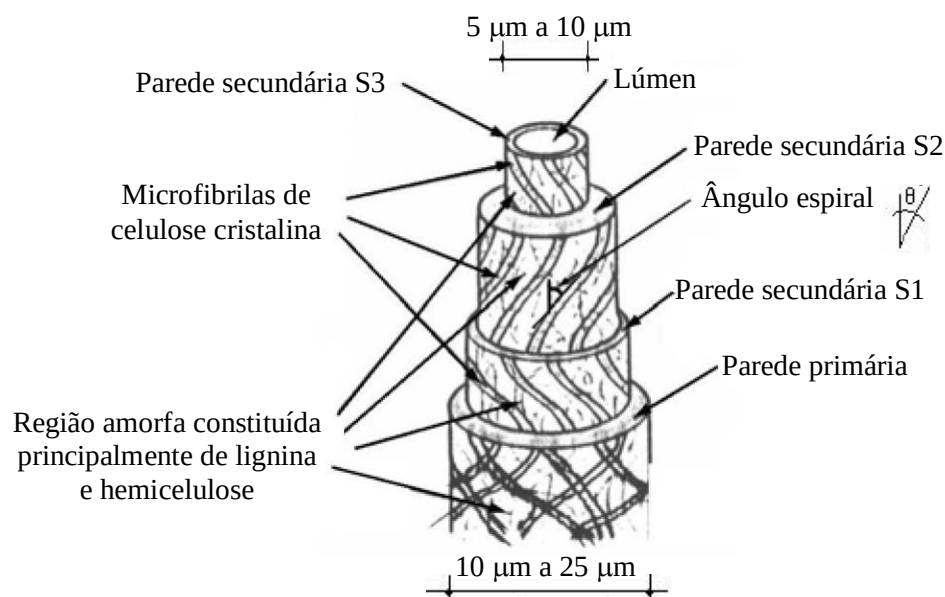


Figura 15. Estrutura de uma microfibrilha vegetal (RONG et al., 2001 apud SILVA, 2003)

Tabela 2. Propriedades de fibras vegetais e sintéticas.

Fibra	Densidade (g/cm ³)	Alongamento (%)	Tensão na ruptura (MPa)	Módulo de Young (GPa)
Pupunha	1,14 +/- 0,26	1,5 +/- 0,4	26,19 +/- 12,22	19,68 +/- 6,6
^(d)	1,3-1,46	--	21-60	0,55
Algodão ^(a)	1,5-1,6	7,0-8,0	287-597	5,5-12,6
Juta ^(a)	1,3	1,5-1,8	393-773	26,5
Rami ^(a)	--	3,6-3,8	400-938	61,4-128
Linho ^(a)	1,5	2,7-3,2	345-1035	27,6
Sisal ^(a)	1,5	2,0-2,5	511-635	9,4-22
^(b)	1,511	4	467,04	13,4
^(c)	--	11-15	80-164	1,46
^(d)	1,2-1,45	--	560	26,0-32,0
Coco ^(a)	1,2	3,0	175	4,0-6,0
^(b)	1,289	32	105,97	1,9
^(d)	1,15-1,33	--	250	4,0-5,0
Carbono ^(a)	1,4	1,4-1,8	4000	230,0-240,0
Curauá ^(a)	1,4	4,2	890-4200	50,4
Cana-de-açúcar ^(b)	1,375	9	212,27	3,6

^(a)Marinelli et al. (2005, apud TEMER, 2010); ^(b)Motta et al. (2007); ^(c)Athijayamani et al. (2009); ^(d)Hejazi et al. (2012).

Li et al. (2000) comentam que as porcentagens dos constituintes de uma fibra podem variar segundo a localização da fibra na planta, idade, o tipo de solo, o clima, processos de extração e de armazenagem, inclusive do período de corte e beneficiamento da fibra. Todas estas variáveis, segundo Swamy (1990), são responsáveis pela fragilidade, baixo módulo de elasticidade, alta absorção de

água, susceptibilidade ao ataque de fungos e insetos, pouca durabilidade em ambientes alcalinos e variabilidade de propriedades, até para fibras de mesmo tipo. Na tabela 3 tem-se a composição química de diversas fibras, podendo-se observar a variedade da composição das fibras de banana e coco, segundo sua localização na planta.

A variabilidade influencia diretamente na chamada zona de transição. Essa zona é a região interfacial entre as duas fases (fibra e matriz), responsável pelo comportamento do compósito. Sendo uma camada delgada, de 50 a 100 μm de espessura, a zona de transição geralmente é mais fraca que as demais fases, e contém uma distribuição heterogênea, de diferentes tipos e quantidades de estruturas sólidas, poros e microfissuras, sendo sujeita a modificações com o tempo, umidade e temperatura (SAVASTANO e AGOPYAN, 1999).

Tabela 3. Composição de diferentes resíduos em termos de cinzas, hemicelulose, lignina e celulose, expressa em % massa seca.

Natureza da fibra	Lignina	Celulose	Hemicelulose	Extrativos	Outros
Folha da bananeira ^(a)	24,84	25,65	17,04	9,84	22,63
Caule da bananeira ^(a)	15,07	31,48	14,98	4,46	34,01
Coco (fruto) ^(a)	46,48	21,46	12,36	8,77	10,93
Folha do Coqueiro ^(a)	29,70	31,05	19,22	1,74	18,29
Sisal ^(a)	11	73,11	13,33	1,33	1,23
^(b)	26	38,2	26	--	9,8
^(c)	8 - 11	67 - 78	10 - 14,5	--	4 - 7,5
Curauá ^(d)	7,5	73,6	9,9	--	9
Pó de bainha de pupunheira ^(e)	9,53	30,20	18,33	--	2,95
Resíduo industrial de algodão ^(f)	5,27	75,45	8,94	--	3,35
Palha da bananeira ^(g)	17,58	48,89	28,02	--	4,77
Palha do arroz ^(g)	9,11	29,04	18,04	--	14,32

^(a) Arsêse et al. (2003); ^(b) Ramakrishna e Sundararajan (2005); ^(c) Silva, A., (2003);

^(d) LEÃO et al. (2002, apud PAOLI, 2007); ^(e) Farina et al. (2009); ^(f) Holtz (2008, apud FARINA et al., 2009); ^(g) Bonatti (2001, apud FARINA et al., 2009).

O acréscimo de resistência à tração de compósitos fibrosos, em comparação a compósitos sem fibras, é certamente a mais importante propriedade obtida pela estabilização, como apontado por Houben e Guillaud (1994). Barbosa e Ghavami (2007) acrescentam que, além do ganho substancial de resistência à tração, a inserção de fibras de alto ou baixo módulo de elasticidade em matrizes de solo é capaz de impedir a fissuração durante a secagem, distribuindo as tensões de retração em toda a massa do material, além de melhorar o comportamento do material pós-fissuração, dando-lhe ductilidade e capacidade de absorver energia.

Ghavami et al. (1999), investigando a introdução de fibras vegetais (sisal e coco) em matrizes de solo, observaram que o reforço fibroso acresceu a capacidade de absorção de energia dos compósitos. A explicação dada pelos autores fundamenta-se na redistribuição das forças internas do solo para as fibras, mencionando que as fibras trabalham juntamente com o solo, observando que em grande parte, houve o arrancamento das fibras. O aumento da capacidade de resistência pós-fissuração em matrizes de solo também foi observado nos estudos de Yetin et al. (2008), Bouhicha et al. (2005), Segetin et al. (2007), Prabakar e Sridharb (2002), Pinto (2008), entre outros.

Bouhicha et al. (2005), analisando a adição da fibra da palha da cevada em matrizes de solo, observaram um acréscimo de resistência à compressão de 10 a 20% para adições até 1,5% de fibras, em peso de solo seco, o qual dependeu do tipo de solo utilizado. A adição de fibras acima de 3,5%, em peso de solo seco, ocasionou uma queda de resistência de 45%. Galán-Marín et al. (2010) inseriram pequenas porcentagens (0,25-0,5%), em peso, de fibras animais (lã) em elementos de terra. As fibras com cerca de 10 mm foram dispostas aleatoriamente. A densidade dos espécimes manteve-se em torno de 1.80 g/cm^3 e os ensaios realizados foram os de compressão simples e flexão em 3 pontos (velocidade de ensaio de 0,5 MPa/s). Um dos benefícios apontados pelos autores foi a ausência de fissuras de retração devido a adição das fibras. Foi observado, também, o comportamento tenaz da matriz com adição de fibras, devido à redistribuição das forças internas da matriz de solo para as fibras. Após a ruptura, os corpos de prova com fibras se mantiveram inteiros em contraposição ao espécime sem fibras.

Yetgin et al. (2008) estudaram a influência da adição de fibras em 5 tipos diferentes de solo, observando, em relação à trabalhabilidade, que à medida que se acrescentaram fibras vegetais houve a necessidade de se aumentar a quantidade de água, em razão das propriedades higroscópicas das fibras. Porém, o aumento da quantidade de água ocasionou o decréscimo da densidade e, conseqüentemente, da resistência dos adobes. Os solos arenosos com maiores quantidades de fibras mostraram mais frágeis (quebradiços). A taxa de retração aumentou concomitantemente ao aumento de argila e água, observando-se o decréscimo da taxa de retração com o aumento da fração volumétrica de fibras, concluindo que o máximo de fibras adicionadas aos tijolos deve se restringir a 0,5% do peso do solo seco.

2.6.1.

Sisal (*Agave sisalana*)

Li et al. (2000) comentaram que o sisal (*Agave sisalana*) está entre as fibras vegetais mais utilizadas no planeta, sendo a principal fibra dura produzida no mundo, correspondendo a aproximadamente 70% da produção comercial de todas as fibras desse tipo. No Brasil, o cultivo se concentra na região Nordeste, sendo os estados da Bahia, Paraíba e Rio Grande do Norte os principais produtores, com 93,5%, 3,5% e 3,0%, respectivamente, da produção nacional.

Atualmente, a fibra beneficiada é destinada à indústria de cordoaria, para confecção de cordas, cordéis, tapetes, capachos, etc., sendo também excelente matéria prima para a fabricação de celulose, papéis finos e para a indústria farmacêutica. Uma planta produz cerca de 200-250 folhas e cada uma contém cerca de 1000-1200 feixes de fibras, compostos por 4% de fibras, 8% de matéria seca e aproximadamente 90% de água. O processo de beneficiamento da fibra de sisal, em sua quase totalidade, ainda é feito com a máquina desfibradora paraibana, conhecida por problemas de mutilação causados aos seus operadores. O desfibramento deve ser feito logo após a colheita, quando a folha é golpeada e, por raspagem, elimina-se a polpa que envolve as fibras. Uma máquina operada por dois homens pode beneficiar 6.000 folhas ao dia, cerca de 90 a 120 kg de fibras (IBICT, 2007). As figuras 16a, b apresentam imagens em microscopia eletrônica de varredura da morfologia interna da fibra de sisal.

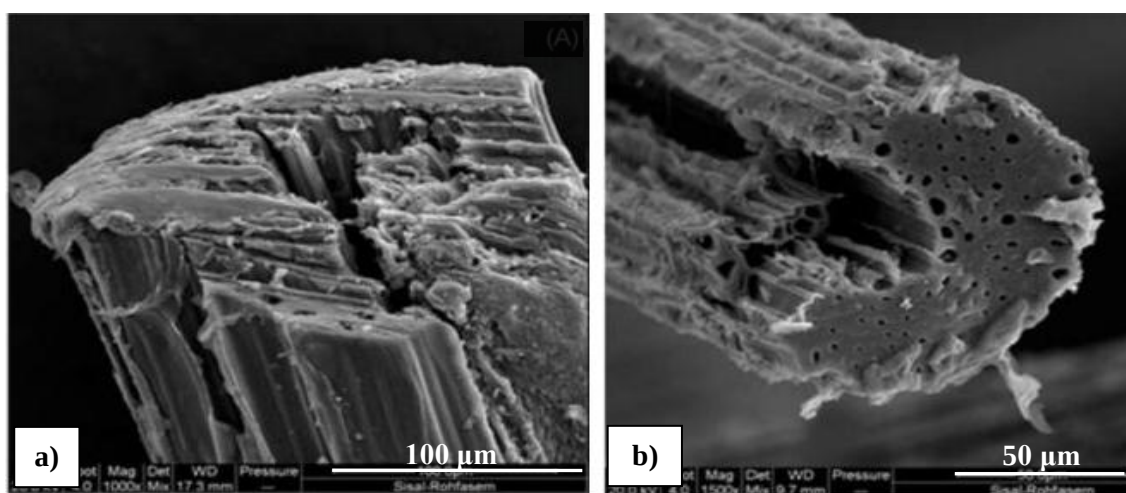


Figura 16. Microscopia eletrônica de varredura da morfologia interna da fibra de sisal (ANDRADE et al., 2007).

Sisal e coco foram estudados por Ghavami et al. (1999), que inseriram 4% de fibras, em peso de solo seco. Os autores observaram que as fibras impediram as fissuras por retração. Toledo Filho et al. (2005), investigando a influência no comportamento da retração e fluência de compósitos cimentícios reforçados com fibras vegetais, notaram que a retração é significativamente reduzida pela inclusão das fibras.

É importante ressaltar que a criação de canais, proporcionada pela adição de fibras vegetais, conforme explicitado por Toledo Filho (2005) e outros autores, só ocorre em matrizes que são inicialmente fluidas, como o caso de concretos, argamassas, etc. No caso do BTC este comportamento não se verifica.

Pinto (2008) avaliou a influência no comportamento mecânico (ensaio de compressão simples e diametral) e absorção de água por imersão, da inserção de fibras de sisal e curauá (25 e 35 mm) e frações de 0,5% e 1%, em peso de solo seco, em matrizes de terra (solo argiloso e arenoso). O autor observou um aumento de 300% da resistência a compressão simples, das matrizes com fibras em relação aos corpos de prova de referência (sem fibras). Os ensaios de absorção de umidade não indicaram aumento da taxa de absorção. A explicação é que a estabilização mecânica tenha criado tensões internas entre fibra e matriz, impedindo que as fibras absorvessem água, melhorando a zona de transição.

2.6.2.

Pupunha (*Bactris gasipaes* Kunth)

A pupunheira é uma palmeira da família das palmáceas, nativa dos trópicos úmidos americanos, cultivada por índios da América Central e Amazônia desde aproximadamente 1545, porém não se sabe com exatidão a sua origem apesar do conhecimento de seu uso por índios que ocupavam as regiões quentes desde o Estado do Pará ao sul do México (CARMO et al., 2003 apud SANTOS, 2007). Considerada uma arecácea espinhosa, geralmente multicaule, o seu estirpe (caule) pode atingir 15 m de altura e 18 cm de diâmetro, podendo ter espinhos ou não, com folhas pinadas e arqueadas (PUPO, 2012). A pupunha é capaz de produzir frutos (palmitos) entre 18 a 24 meses de idade, tornando-o uma excelente opção na substituição da extração de palmitos de espécies de palmeiras nativas (Açaí e

Juçara), que necessitam entre 8 e 10 anos para alcançarem seu estágio maduro. As figuras 17a,b mostram o palmito beneficiado previamente.

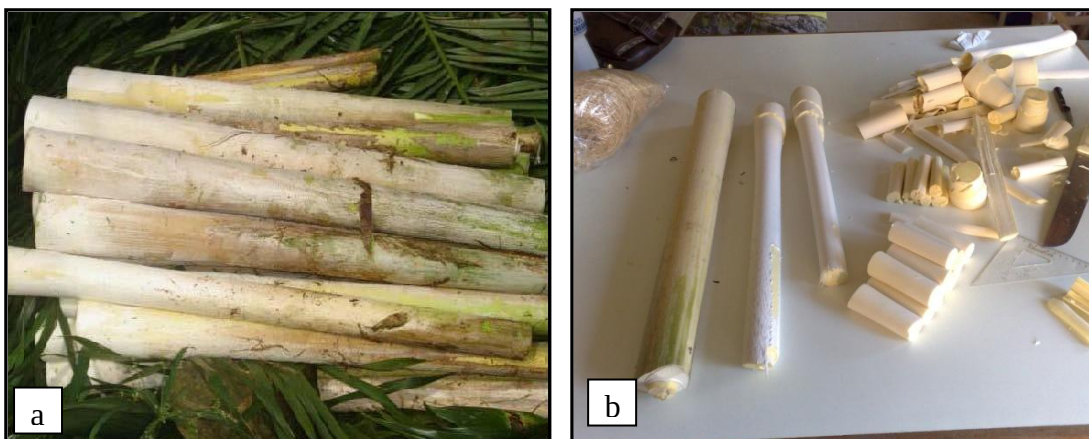


Figura 17. (a) Hastes pré-beneficiadas; (b) Palmito preparado para o comércio (TEMER, 2010).

O palmito (massa mole com baixo teor de fibras) é envolvida por uma camada semi-fibrosa (Figura 18a), representado de 25 a 30% do peso, e esta é protegida por uma camada externa fibrosa (Figura 18b) que equivale a 30% do seu peso. Segundo Rosolen (2010), a quantidade de resíduo gerado do beneficiamento do palmito equivale a 80-90% do peso bruto. Uma haste de 4kg gera, aproximadamente, 3,5 kg de resíduos. Parte destes resíduos são utilizados como adubo, a parte menos fibrosa é usada como alimento de gado e outros animais e o restante é simplesmente deixado sobre o solo para a decomposição. O processo de degradação é lento, em decorrência da grande presença de fibras, conforme mencionado por Seben et al. (2011, apud PUPO, 2012).

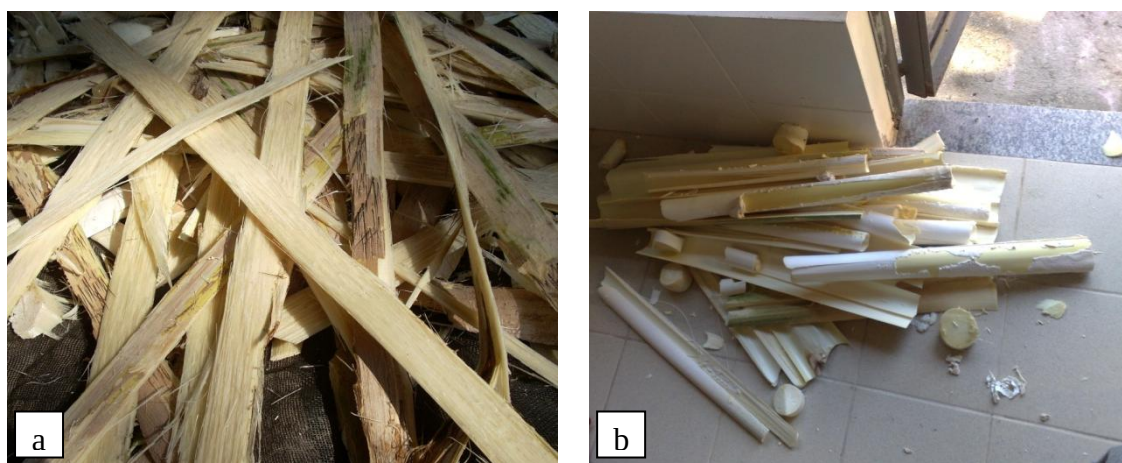


Figura 18. (a) Resíduo da camadas externa do beneficiamento do palmito; (b) Resíduo da camadas interna - semi-fibrosa (TEMER, 2010).

Como solução aos problemas gerados pela simples deposição no solo dos resíduos do beneficiamento do palmito, inúmeras pesquisas tem sido desenvolvidas buscando alternativa para aplicação das fibras naturais que compõem este resíduo. Bacellar e d'Almeida (2009) estudaram o comportamento mecânico do estirpe (caule) da pupunha. Ensaio de resistência a flexão (três pontos), compressão simples e abrasão, indicam a potencialidade do uso das laminas de pupunha na construção de painéis e móveis, por apresentar níveis de resistência próximas a madeiras duras como o Jatobá e a Maçaranduba.

Fontan Jr. et al. (2010) estudaram a aplicação das fibras de pupunheira na forma de tramas bidimensionais, em compósitos de resina poliéster insaturado com fibra de vidro, e avaliaram o efeito dessa aplicação no desempenho mecânico, na degradação térmica e na taxa de absorção de água. Os autores observaram que, em relação à tração, o desempenho mecânico não foi comprometido ao adicionar as fibras de pupunheira. Os resultados de resistência sob impacto, indicaram um aumento de 94% no desempenho do compósito contendo 19% de fibra natural, em relação ao que continha apenas a fibra de vidro como reforço.

Farina et al. (2012) observaram os efeitos de diferentes proporções de fibras da pupunheira, na forma de trama e manta, no desempenho mecânico de compósitos com matriz polimérica (poliéster). As frações de fibras foram de 6%, em peso para tramas e 6 e 10%, em peso para mantas. Ensaio de tração e absorção de água foram realizados, indicando alterações significativas no módulo de elasticidade do compósito, além de um acréscimo de 5% no teor de água absorvido.

Lopes et al. (2012) avaliaram a densidade, absorção de água e umidade de painéis com resíduos termoplásticos (polipropileno, polietileno e acrilonitrila butadieno estireno) e as fibras de pupunha. Os autores observaram bons resultados com 100% de resíduo plástico, 70% de plástico e 30% de fibras e 60% de plástico com 40% de resíduo da pupunha.

Magalhães et al. (2013) adicionaram fibras de pupunha (20-40%, em peso) em matriz de polipropileno (PP). Os autores observaram que, com o aumento da adição de reforço, a resistência à compressão e ao impacto decresceram. Em contrapartida, a massa específica e dureza (Shore D) aumentaram com a adição das fibras, indicando que a fração máxima de inserção deve ser de 30%, em peso.

Marandi et al. (2008) avaliaram a resistência e ductilidade de compósitos de matriz de terra reforçado com fibra de palmeira (comprimento de 20 a 40 mm e fração volumétrica de 0% a 1%, em peso). Os autores observaram o aumento de resistência à compressão simples, com o aumento da fração volumétrica, mantendo-se constante o comprimento da fibra. Comportamento análogo se observou, mantendo-se a fração volumétrica fixa e variando-se o comprimento da fibra.

Sallehan e Yaacob (2011, apud HEJAZI, 2012) observaram que adições de 3%, em peso, de fibras de palmeira, melhoraram a resistência a compressão de blocos de terra. Ensaio de absorção por imersão indicaram o aumento da taxa de absorção com o aumento da fração do reforço fibroso.

Santos et al. (2008) avaliaram o comportamento da fibra de pupunha tratada e não tratada no reforço de matrizes poliméricas. O tratamento químico foi realizado com a imersão das fibras em solução de H_2O_2 , NaOH e C_3H_3N e a matriz polimérica foi o poliéster. Os resultados dos ensaios de tração não demonstram diferenças significantes entre os compósitos com fibras tratadas e não tratadas. Os ensaios de impacto mostraram acréscimo de resistência para os compósitos com fibras tratadas com H_2O_2 (10%, em peso).

As fibras de pupunha foram submetidas a um tratamento para a retirada de impurezas na superfície da fibra, para uma melhor aderência entre fibra e matriz. Bisanda (2000) aplicou tratamento anti-alcálico para melhorar a zona interfacial fibra/matriz. Os resultados comprovaram a alta dependência das propriedades compressivas dos compósitos fibrosos com a rigidez interfacial. As fibras imersas na matriz, sob carregamento compressivo são susceptíveis a micro-flambagem, embora a matriz sendo rígida, não dá garantia de um perfeito confinamento da fibra. A fibra utilizada nos estudos foi o sisal em uma matriz polimérica (epóxi).

Imagens obtidas em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) ilustram o resultado do tratamento de lavagem em água corrente e posterior cozimento em solução química (cinza coada e extrato pirolenhoso), figuras 19a,b. Para obtenção das imagens utilizou-se um microscópio Zeiss modelo DSM 960 com voltagem de aceleração do feixe de elétrons de 10 kV e aumento entre 100 e 2000 vezes. Na análise superficial, foi utilizado o detector de elétrons secundários. O tratamento pouco contribuiu para a retirada das impurezas.

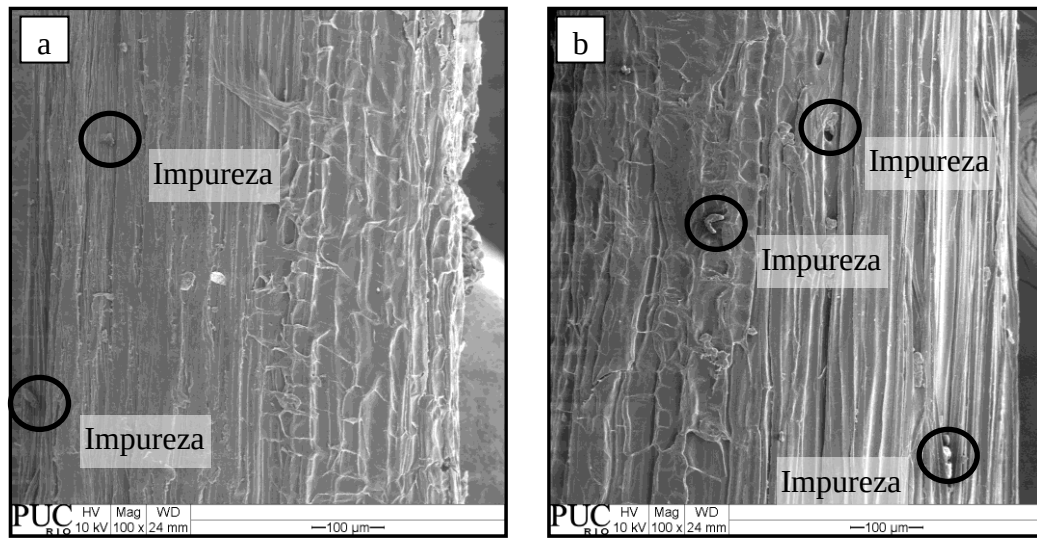


Figura 19. (a) Fibra tratada; (b) Fibra sem tratamento (TEMER, 2010).