

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Desenvolvimento Sustentável versus Construção Civil

O ambiente construído é o produto da transformação do meio, por técnicas de manufatura dos recursos naturais e, dependendo da maneira como é obtida e/ou transformada, causa maior ou menor impacto. Presznuk (2005) comenta que cada obra construída apresenta-se como um pequeno “ponto de poluição” que, de forma dispersa e em grande número, acarreta em conseqüências consideráveis para o meio ambiente. Além da poluição gerada pelo processo produtivo, verifica-se o uso desmedido dos bens naturais. Segundo Pessis (2001, apud SAVASTANO, 2001) a indústria da construção consome o equivalente a 16% de toda a água potável no mundo, bem como utiliza diretamente ou indiretamente de 30 a 40% de toda energia consumida, gerando entre 20 e 30% de todo o lixo do planeta. Sob este aspecto, Leonardo Boff, teólogo e escritor, comenta que:

Como espécie – Homo sapiens et demens -, temos ocupado já 83% do planeta, explorando para nosso proveito quase todos os recursos naturais. A voracidade é tal, que temos depredado os ecossistemas a ponto de a Terra ter superado já em 20% sua capacidade de suporte e regeneração. Mais ainda, fizemo-nos reféns de um modelo civilizatório depredador e consumista que, se universalizado, demandaria três planetas semelhantes ao nosso, [...] (TRIGUEIRO, 2003, p.35).

Sob este prisma, faz-se necessário um planejamento que vá além das necessidades e aspirações das populações atuais, exigindo de imediato, a incorporação das questões de dimensão ambiental, energética, social, política e econômica.

O aço, o tijolo cerâmico cozido e o cimento são os materiais mais utilizados na construção civil e estão entre os principais inimigos do meio ambiente, ora ocasionando poluição através de seus rejeitos e processos de fabricação, ora utilizando demasiadamente os recursos naturais finitos. Baier (1982 apud SOUZA, 1993) indica, com respeito aos prejuízos ao meio ambiente, que a produção de uma tonelada de aço – que alimenta inúmeros setores produtivos – requer 50 m³ de oxigênio, lançando na atmosfera grandes quantidades de CO₂. A quantidade de escória que resulta deste processo é de montante considerável.

Os tijolos cerâmicos, por sua vez, são provenientes da queima da argila. O barro (argila) é retirado de forma desorganizada e sem planejamento dos barreiros, dissociada de procedimentos que contribuam para a recuperação do espaço lavrado (CARVALHO, 2000). Para a produção de um milheiro de tijolos são necessários aproximadamente 2 m³ (dois metros cúbicos) de biomassa, o que equivale à cerca de 10 (dez) árvores de porte médio. No Nordeste brasileiro, sua fabricação utiliza quase sempre a vegetação nativa como combustível, contribuindo para a devastação de quase um milhão de quilômetros quadrados de reservas como a mata atlântica, o cerrado e a caatinga (AGENDA 21, 2001). Proporcionando o aumento do grave e preocupante processo de desertificação de alguns estados brasileiros, além de contribuir com o aumento da liberação de CO₂ para a atmosfera.

Já o cimento, provém da exploração de jazidas de calcário e argila, materiais finitos e cuja retirada destrói sistematicamente a região de extração. O calcário juntamente com a argila são calcinados em fornos para a produção do clínquer. Nestes fornos utiliza-se como combustível o óleo, o gás natural – ambos subprodutos do petróleo – além do carvão mineral e vegetal e em alguns casos pneus. A queima de pneus além de emitir os chamados “gases do efeito estufa” é em parte responsável pela poluição da atmosfera por enxofre, ocasionando chuvas ácidas que podem causar acidificação das águas e do solo (LOBATO, 2004).

Estima-se que a quantidade de gás carbônico, liberada na atmosfera pela indústria cimentícia, seja responsável por cerca de 7% da emissão de CO₂ no planeta. Um número que sobe para além dos 10% em países que vêm se desenvolvendo rapidamente, como a China, que atualmente produz uma em cada três toneladas de cimento empregadas no mundo. A cada ano, cerca de 1,7 bilhões de toneladas de cimento Portland são produzidas, um espantoso total de 250 kg

por habitante no planeta (PIERCE, 2004). Segundo dados do CDIAC (Carbon Dioxide Information Analysis Center) a emissão total de CO₂, provenientes da indústria cimentícia, ano base 2004, no Brasil, na China e nos Estados Unidos foi de 5,17, 9,65 e 8,53% respectivamente (Tabela 1). A figura 1 ilustra a disparidade entre nações quanto à emissão de CO₂ por combustíveis fósseis (Brasil x EUA).

Tabela 1. Total de emissão de CO₂, em 10³t de carbono (CDIAC, 2007).

Ano	combustíveis fósseis	produção de cimento – (% do total)
Brasil		
2002	88756	5172 - (5,83%)
2003	85426	4625 - (5,41%)
2004	90499	4680 - (5,17%)
China		
2002	989567	98600 - (9,96%)
2003	1159593	117243 - (10,11%)
2004	1366554	131920 - (9,65%)
Estados Unidos da América		
2002	1791456	141910 - (7,92%)
2003	1794932	146530 - (8,16%)
2004	1824421	155660 - (8,53%)

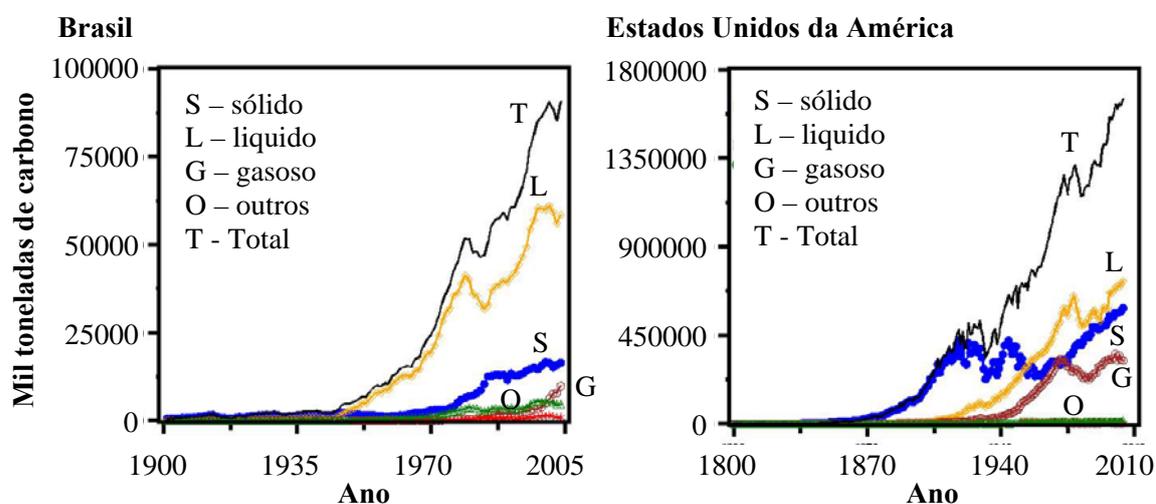


Figura 1. Emissão de CO₂ pelo uso de combustíveis (CDIAC, 2007).

O acréscimo de gás carbônico na atmosfera implica no fenômeno conhecido como “efeito estufa”. As conseqüências advindas do efeito estufa podem ser observadas na atualidade com a lenta elevação dos níveis dos mares, provocado pelo derretimento das geleiras e aumento da temperatura dos oceanos; alterações das correntes marítimas, propiciando mudanças climáticas drásticas em muitas regiões; alterações significativas na pluviosidade em diversas áreas continentais e;

incremento da frequência e da intensidade das tempestades tropicais, incluindo furacões, ciclones, e outros.

Quanto ao consumo energético, os materiais de construção exigem quantidades diferentes de energia, que varia de acordo com o nível de industrialização e processo usado para conversão dos recursos naturais (KRÜGER e SANTOS, 2003). A necessidade energética começa com a extração de matéria-prima, processo de manufatura, transporte ao local da obra, bem como compreende todo o processo construtivo. Assim, o incentivo ao uso de materiais industriais conduz, por razões técnicas e/ou financeiras, a um aumento substancial no consumo de energia, emissão de poluentes e desperdício. A tabela 2 apresenta o consumo energético dos principais materiais de construção correlacionando-os a emissão de CO₂. A tabela 3 apresenta a necessidade energética das nações por habitante.

Tabela 2. Consumo energético e emissão de CO₂, ano base 2007 (MME, 2007a).

Material	tep/t	kWh/t	kg.CO ₂ /t**	CO ₂ (Mt) **
Aço (usina integrada)	0,55	500	--	--
Aço (usina semi-integrada)	0,18	1700	--	--
FerroLigas	1,30	2800 - 13500	--	--
Fundidos	0,17	990	--	--
Alumínio	1,07	15000	--	--
Silício	--	12000	--	--
Cobre	0,32	1670	--	--
Pedra Britada	--	2,5	--	--
Minério de Ferro	--	17	--	--
Cerâmica Vermelha	0,052	17	185	24,4
Cerâmica de Revestimento	0,089	100	188	1,7
Cimento	0,076	109	263	11,0
Vidro	0,24	650	480	1,2

*tep - tonelada equivalente de petróleo

**Elaboração DTTM/SGM (2007, apud MME, 2007b), ano base 2006.

Tabela 3. Consumo final de energia, ano base 2007 (MME, 2007a).

	Energia total (tep/hab)	Energia Elétrica (kWh/hab)
Brasil	1,08	2,086
EUA	7,91	13,338
China	1,24	1,600
América Latina	1,10	1,645
Mundial	1,77	2,516

Minimizar o consumo de materiais convencionais usando materiais, métodos e tecnologias alternativas podem resultar em considerável economia energética bem como a redução da emissão de CO₂ (VENKATARAMA E JAGADISH, 2003). Cabe ressaltar que materiais de elevado consumo energético apresentam um alto valor agregado, impossibilitando que pessoas de baixo poder aquisitivo os adquiram. Em resposta nos deparamos com índices mundiais crescentes de deficiência habitacional.

A deficiência de moradias salubres é um problema mundial, tão grave, que a ONU realizou duas conferências mundiais sobre assentamentos humanos - a Habitat 1 em Vancouver, Canadá, 1976 e a Habitat 2, em Istambul, Turquia, 1996, para discutir a situação e apresentar soluções (BRAGION, 2007). Segundo a Declaração Universal dos Direitos Humanos, artigo 25, 1, adotada e proclamada pela resolução 217 A, III, da Assembléia Geral das Nações Unidas em 10 de dezembro de 1948 “Toda pessoa tem direito a um padrão de vida capaz de assegurar a si e a sua família saúde e bem estar, inclusive alimentação, vestuário, habitação, assistência médica e os serviços sociais indispensáveis...”. Porém o direito a habitação ainda não é reconhecido legalmente por alguns países, e devido a taxas crescentes de pobreza, a falta de habitação tornou-se um dos maiores problemas humanos em todo o mundo.

No Brasil, estudos da Fundação João Pinheiro (2006), estimam uma necessidade habitacional, no ano de 2005, de 7.902.699 moradias, o que significa 14,9% do total do estoque de domicílios. Em números absolutos, o déficit está predominantemente concentrado nas áreas urbanas, 6.414.143 domicílios, dos quais 2.226.730, nas regiões metropolitanas. Em termos da distribuição regional, as regiões Sudeste e Nordeste são responsáveis por 71,4% destas carências. Analisando o perfil das famílias segundo a faixa de renda, a quase totalidade (96,3%) é de famílias que recebem até cinco salários mínimos, porém a carência é maior em faixas mais baixas de renda. Observou-se o crescimento, no ano de 2000, de 82,5%, na faixa até três salários mínimos, para 90,3% em 2005.

O déficit habitacional é uma medida direta das carências de moradia de uma determinada sociedade. A computação é realizada sob o número de habitações precárias, de coabitações familiares e de ônus excessivos com aluguel. Na figura 2 é ilustrada a contribuição destas três componentes no total da insuficiência habitacional brasileira.

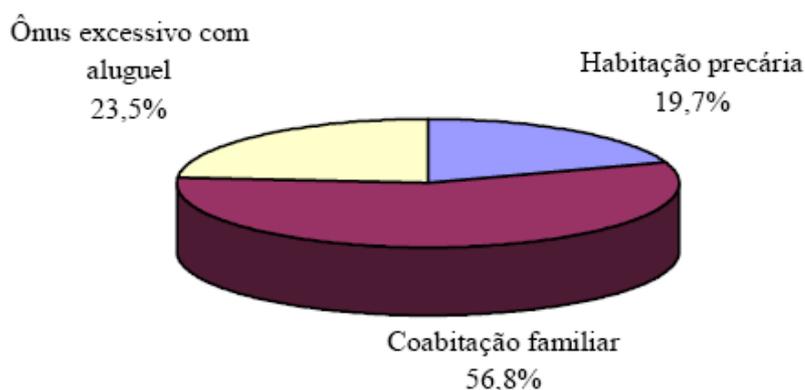


Figura 2. Distribuição dos componentes do Déficit Habitacional Brasileiro (FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO, 2006).

Por habitação precária entendem-se os domicílios improvisados e rústicos, sem paredes de alvenaria ou madeira, resultando em desconforto e risco de contaminação por doenças, em decorrência das condições de insalubridade. A componente coabitação familiar compreende a soma das famílias que vivem junto à outra família em um mesmo domicílio e das que vivem em cômodos. Ônus excessivo com aluguel corresponde às famílias urbanas, com renda familiar de até três salários mínimos, que moram em casa ou apartamento e que despendem mais de 30% de sua renda com aluguel (FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO, 2006).

Diante deste quadro, de profunda desigualdade social aliada à destruição intensiva do meio ambiente e uso insensato de energias não renováveis, faz-se necessária à adoção de um planejamento que incorpore as questões de dimensão ambiental, social e energética. Observa-se que o atual padrão de desenvolvimento está ultrapassado e equivocado, por ameaçar a sobrevivência da humanidade num futuro recente. O desenvolvimento e a aplicação de materiais e métodos construtivos que respeitem o meio ambiente, reduzam o consumo de energia e sejam acessíveis à parcela marginalizada da sociedade, são instrumentos adequados à indústria da construção civil para manutenção e efetiva sobrevivência de todo o planeta.

2.2. Construção Sustentável

O uso do solo como material de construção iniciou-se no momento em que nossos ancestrais deixaram de ser nômades e passaram a cultivar seu próprio alimento, cerca de 10.000 anos atrás. As primeiras cidades foram construídas com terra, hoje, para construir nossas moradias, empregamos 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, berço 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). As figuras 3a,b ilustram ruas e casas da cidade de Bam (Irã). Construções habitacionais em Gana (África) podem ser visualizadas nas figuras 4a,b. Construções habitacionais (Figura 5a) e templo indígena (Figura 5b) em Chan chan no Peru.

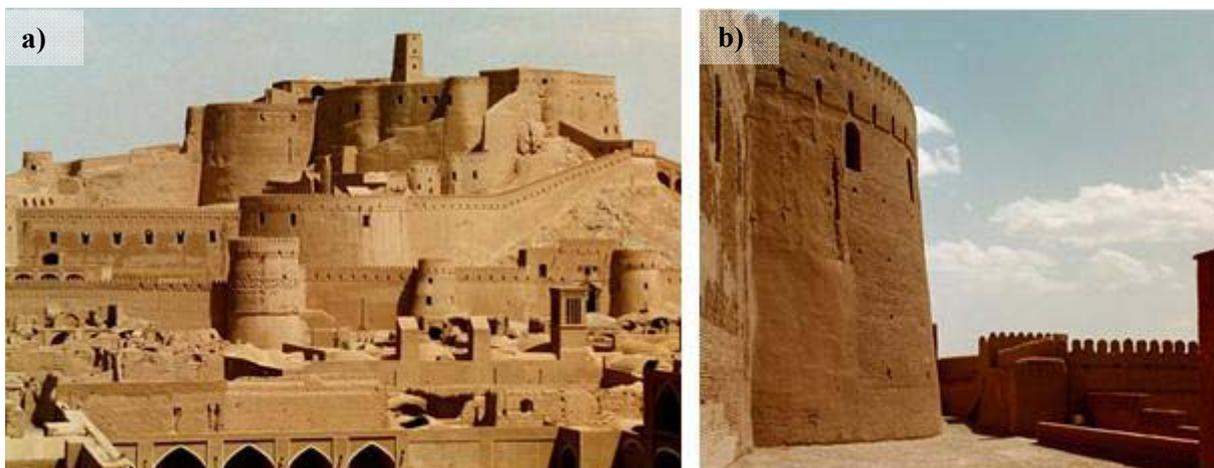


Figura 3. Ruas e casas da cidade de Bam – Irã, Ásia (GHAVAMI, 2007).



Figura 4. Construções da cidade de Navrongo – Gana, África (CRATERRE, 2004).

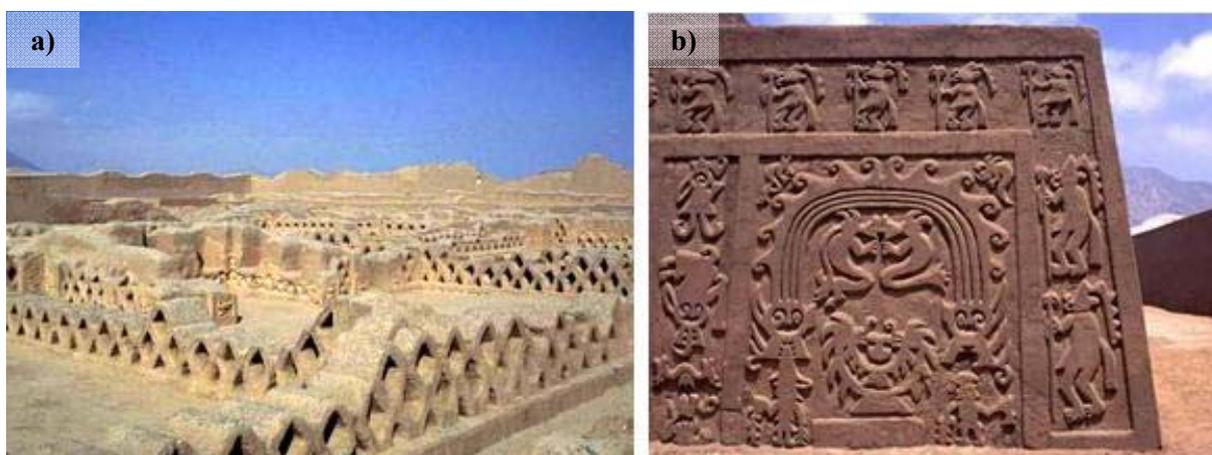


Figura 5. Construções em Chan chan – Perú, América do Sul (CRATERRE, 2004).

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 de edifícios em terra crua. A grande muralha da China, há 4.000 anos, foi construída inicialmente com terra batida e depois substituída por pedras e tijolos; o templo de Ramsés II, no Egito, foi construído em Adobe há 3.200 anos; a parte central da Pirâmide do Sol em Teotihuacan, México, com uma base de 225 m² e 63 m de altura, foi construída entre 300 e 900 d.C., tem aproximadamente 2 milhões de toneladas de terra. 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. O bom desempenho das construções é prova inconteste das possibilidades de emprego desse material de qualidade, quando convenientemente empregado (SOUZA, 1993).

Nas proximidades de Lyon, França, uma cidade chamada Isle d'Abeau, foi edificada inteiramente utilizando terra crua. As figuras 6 a,b,c,d ilustram algumas destas construções. As figuras 7a,b,c,d, apresentam habitações em SuperAdobes, e as figuras 7e,f referem-se a um centro de vivência em Blocos de Terra Comprimida na Califórnia (EUA), projeto do arquiteto Nader Khalili.

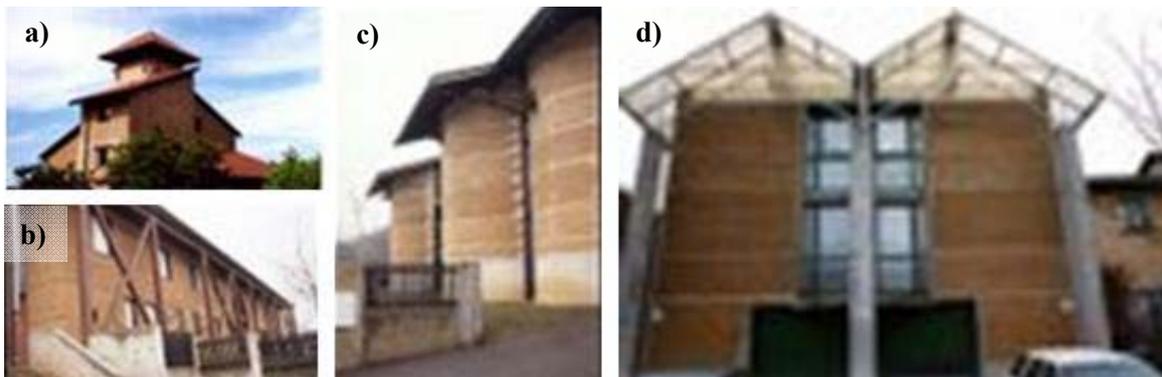


Figura 6. Construções em Isle d'Abeau – França, Europa (INTI, 2007).

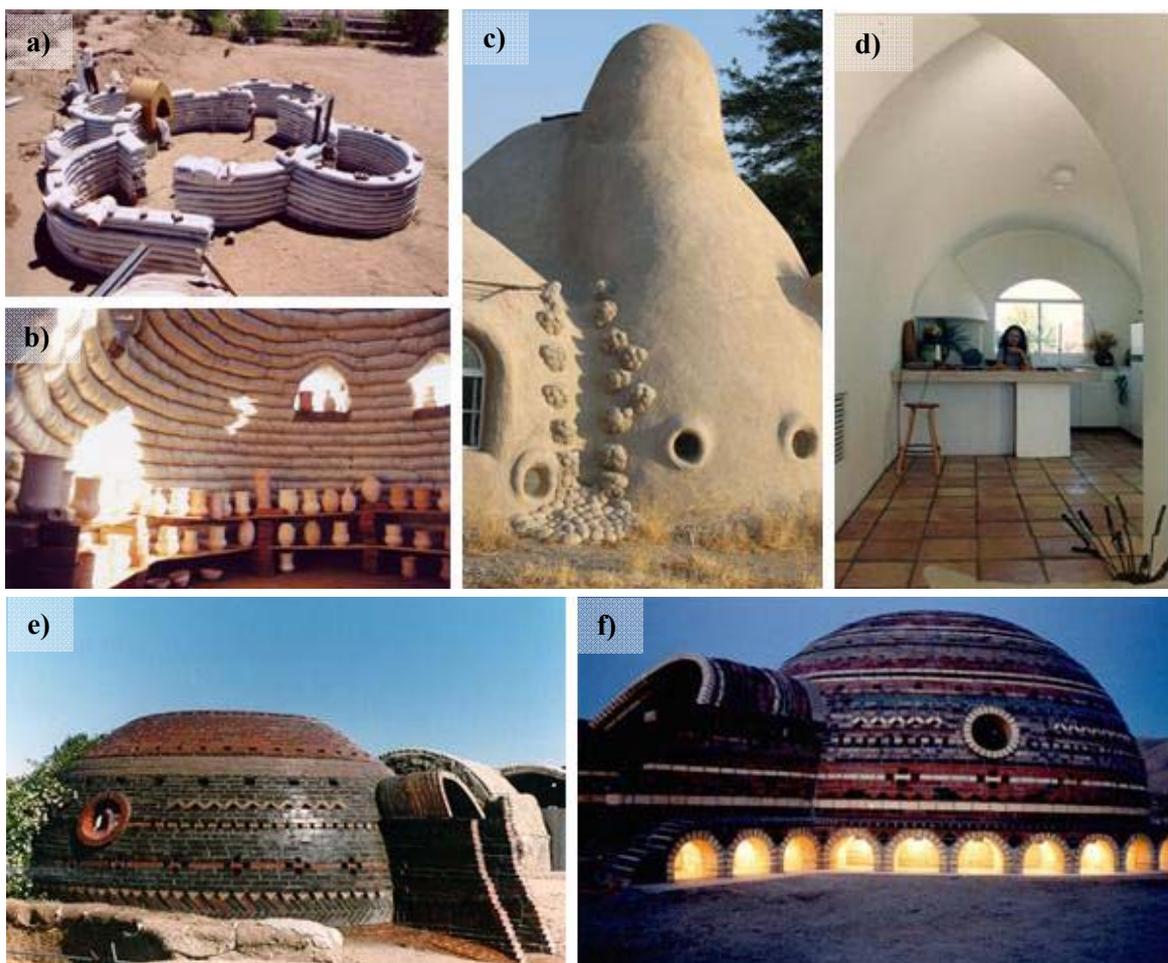


Figura 7. Construções na Califórnia – EUA, América do Norte (CALEARTH, 2007).

Houben e Guillaud (1994) definem o solo como um processo longo de deteriorização 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 definido como o material constituído de partículas sólidas que apresentam, entre si, vazios parciais ou totalmente preenchidos por água. É um sistema polifásico, formado por fases sólidas, líquidas e gasosas.

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 pode ter, 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 e; 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). Podem-se citar ainda os Blocos de Terra Comprimida (BTC) e o Tijolo Cerâmico. A figura 8 ilustra as técnicas citadas com seu respectivo modo de produção.

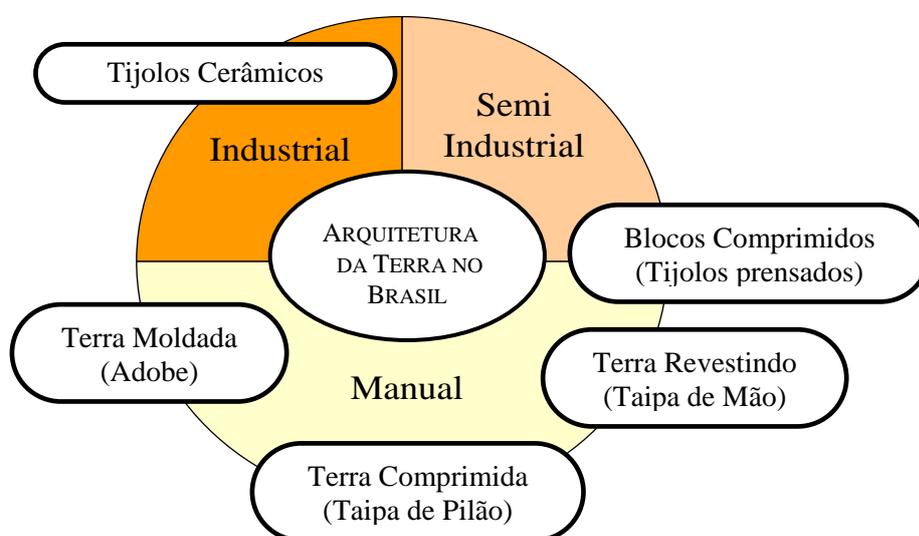


Figura 8. Arquitetura da terra no Brasil e seus modos de produção.

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

2.2.1. Alvenaria de Adobe

Este tipo de técnica de construção com terra crua é utilizada pelo homem há milênios. Elementos em Adobe foram encontrados no Turcomenistão, datando de 6.000 – 8.000 a.C. e na Assíria com 4.000 a.C.. No Egito, monumentos de 3.200 anos podem, ainda hoje, ser contemplados, como as cúpulas e as salas do templo de Ramsés II (MINKE 2000). A figura 9 ilustra pinturas encontradas em templos egípcios.

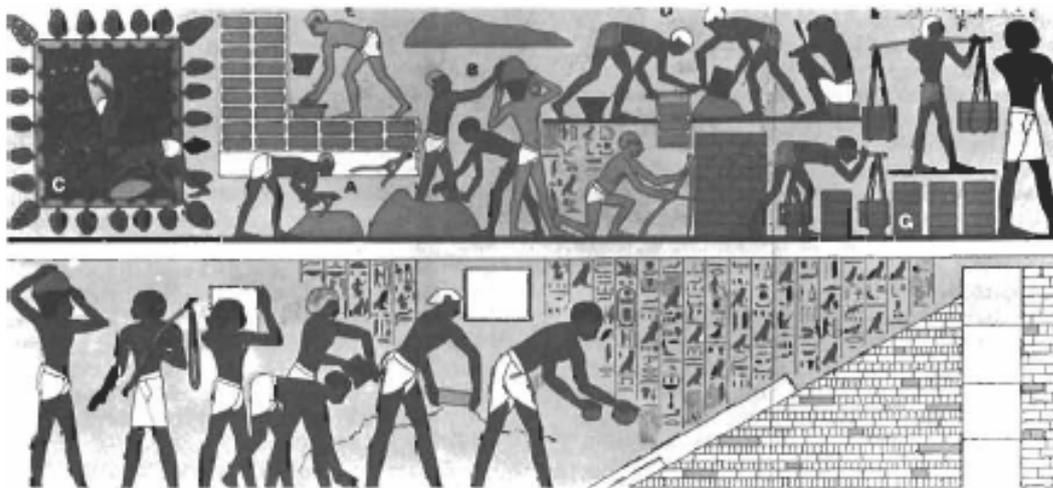


Figura 9. Cena representando escravos produzindo tijolos de Adobe (DOAT et al, 1979).

Adobes são produzidos manualmente, através do solo úmido dentro de fôrmas retangulares de madeira ou aço. Os tijolos não possuem restrições quanto as suas dimensões, apresentando variações nos lugares onde é encontrado. Podem ser maciços ou furados, desde que os furos não representem mais que 15% da área bruta em qualquer que seja o plano. Quanto ao seu emprego, os Adobes devem estar secos, o tempo de secagem dependerá das condições climáticas da região.

Doat et al (1979) estabelecem que o solo mais adequado para produção dos tijolos deve possuir entre 55 e 75% de areia, 10 e 28% de silte e de 15 a 18% de argila. Eventualmente será aceitável material orgânico, desde que este não seja superior a 3%. Alta concentração de matéria orgânica afetará a estabilidade dos elementos de terra. Barbosa et al (1997) sugerem que o limite de liquidez desejável esteja entre 20 e 50%. Em solo argiloso, se observarão fissuras ocasionando perda de resistência e erosão. Se houver areia demais, o tijolo não terá coesão suficiente para permanecer estável e poderá se desagregar.

Quanto à influência do teor de umidade, Barbosa et al (1997) descrevem, para o caso do teor ser baixo, existe a possibilidade da formação de torrões de terra que se aglomeram de forma independente, não se unindo adequadamente à terra posta no molde. Por outro lado, caso o teor de umidade seja elevado, resultará em uma acentuada retração do tijolo durante o processo de secagem, proporcionando o aparecimento de fissuras. Conforme sugerido por muitos autores, a terra a ser utilizada na produção dos tijolos deve permanecer em descanso por no mínimo 24h. Essa prática melhora a qualidade dos blocos, diminuindo a possibilidade de retração na secagem. Pode-se evitar a excessiva fissuração dos tijolos de Adobe inserindo fibras vegetais ou fibras animais, além de estabilizantes químicos como cimento, cal e betume (DOAT et al, 1979).

Para a execução das paredes, aconselha-se que os blocos devam estar totalmente secos e que a espessura da argamassa de assentamento não deva ser maior que 3 mm. No momento do assentamento, os tijolos devem ser umedecidos previamente para que não absorvam a água necessária para hidratação do cimento nas argamassas. Em nenhum caso a qualidade da argamassa deve ser inferior à qualidade do bloco (NTE E.080, 1999).

Com relação à altura da alvenaria, Doat et al (1979) sugerem que a altura máxima não deve exceder 1 m/dia, evitando assim a fissuração das juntas. Embora algumas normas, a exemplo das normas peruana e mexicana (SALAS, 2002), recomendem uma altura máxima, para construção, não superior a 1,5 m/dia. Na figura 10a são apresentadas as fôrmas para a produção do Adobe. A figura 10b, ilustra o processo de fabricação e a figura 10c demonstra uma construção habitacional.



Figura 10. Fôrmas, fabricação e construção em Adobe (BARBOSA e GHAVAMI, 2007).

2.2.2. Taipa de Pilão

Tem-se registro desta técnica construtiva a pelo menos 5.000 a.C. na Assíria (MINKE, 2000). O sistema construtivo consiste na disposição do solo em camadas dentro de uma fôrma, esta fôrma é composta por duas tábuas paralelas que delimitam a espessura da parede por seu distanciamento. O solo é então submetido à compactação utilizando um socador (batedor) que pode ser manual ou mecânico (elétrico ou pneumático). Na França esta técnica é conhecida como “Pise de Terre”, Espanha “Barro Apisonado ou Tapial”, na Alemanha “Stampflembau”, “Taipa” em Portugal e no Brasil “Taipa de Pilão”.

Doat et al (1979) descrevem que o solo conveniente para este tipo de construção deve ter entre 0 e 15% de cascalho, 40 a 50% de areia, 20 a 35% de silte, 15 à 25% de argila e o solo não deve apresentar matéria orgânica. Por sua vez, Pasino et al (1993) sugerem que para a construção se devam utilizar solos argilosos.

Para controlar a fissuração da secagem do barro, aconselha-se a adição de fibras vegetais em proporções inferiores a 0,5% em peso (PASINO et al, 1993). A quantidade de água é fator importante, como citado por Doat et al (1979). O solo não deve estar saturado. Assim, a quantidade de água deverá ser a mínima possível para que se obtenha uma massa trabalhável e que não apresente dificuldades para compactação.

A compactação é uma das fases fundamentais e a escolha do soquete (socador) influenciará na resistência do muro construído. Pasino et al (1993) sugerem soquetes manuais, com peso entre 10 e 15 kg, e o solo deve ser disposto em camadas de 10 cm de altura. Segundo Minke (2000), a base do socador não deve ter área menor que 60cm^2 e maior que 200cm^2 e o peso deve ser de 5 a 9 kg.

Pasino et al (1993) estabelecem que o solo dentro da fôrma deva ser golpeado umas 60 vezes, para o caso do soquete de 10 kg, compactando uma área de 1000cm^2 .

Para as juntas entre as fileiras de taipa, é indicado borrifar água e escarificar a superfície de contato. Camadas de 50 e 80 cm de altura são consideradas ideais para se construir por dia e o máximo comprimento de cada bloco, de preferência, não deve exceder 1,2 m. Minke (2000) sugere que, para evitar eventuais problemas de retração, a alvenaria deve ser moldada inteiramente em sua extensão vertical e sua desmoldagem realizada somente quando o topo da alvenaria é atingido. As figuras 11 a,b ilustram detalhes da fôrma e a figura 11c ilustra o processo de compactação sugerido por Doat et al (1979). Na figura 12 é apresentado um exemplo de construção em Taipa de Pilão.

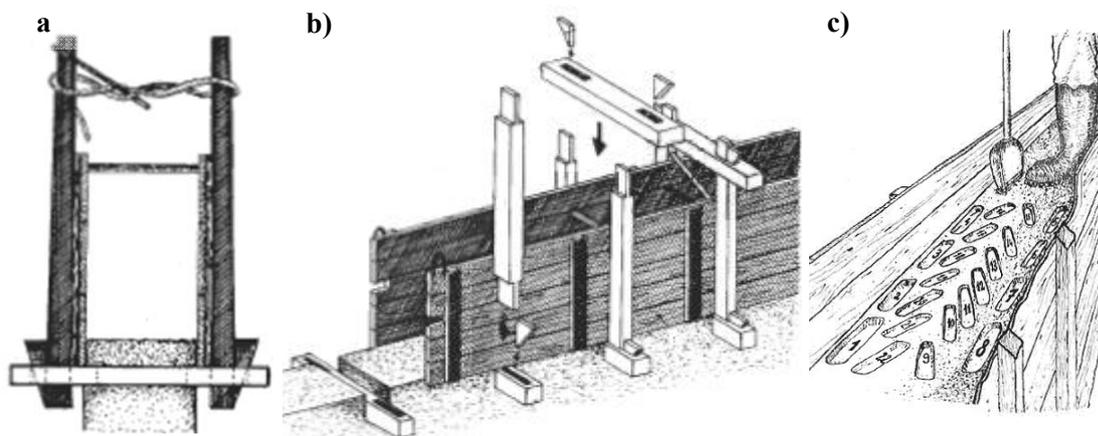


Figura 11. Fôrma e processo de compactação (DOAT et al, 1979).



Figura 12. Construção em Taipa de Pilão – França (INTI, 2007).

2.2.3. Taipa de Mão

Técnica largamente utilizada em regiões tropicais e sub-tropicais do mundo, seguramente mais antiga que a Taipa de Pilão e o Adobe. “Barareque, Bareque ou Quiche” na Espanha, “Lehmbewurf” na Alemanha (MINKE, 2000), “Tabique” em Portugal, “Taipa de Mão” no Brasil ou também conhecida como “Taipa de Sopapo, Taipa de Sebe, Barro Armado ou Pau a Pique”.

Segundo Di Marco (1984 apud LOPES, 2002) esta técnica consiste no preenchimento, com uma mistura de água e terra e eventualmente fibras vegetais, de uma ossadura interna de madeira, formada por ripas horizontais e verticais, com amarração feita de tiras de couro, cipó, barbante, prego ou arame. Lopes (2002) sugere o bambu como material a ser utilizado na armação, pois é uma espécie vegetal resistente e de crescimento rápido, desde que, o material esteja disponível localmente. O barro é jogado com as mãos sobre esta armação, e então pressionado. Após a secagem da primeira camada, é aplicado reboco e posterior pintura. A preparação da mistura para o barreado, em algumas regiões, usa apenas terra e água, enquanto que em outras, são acrescentados fibras vegetais, esterco de gado, cal ou cimento. Observa-se que a espessura do barro deve ser suficiente para evitar eventuais fissuras por retração na secagem, alguns autores sugerem como espessura mínima 20 mm. Os problemas advindos da fissuração vão desde o aceleração do processo de deterioração da construção até a proliferação de insetos nocivos a população, como o barbeiro, vetor da doença de Chagas (MINKE, 2000). Na figura 13a é ilustrada uma parede construída com a estrutura de madeira. Nas figuras 13b,c a ossadura interna é de bambu.

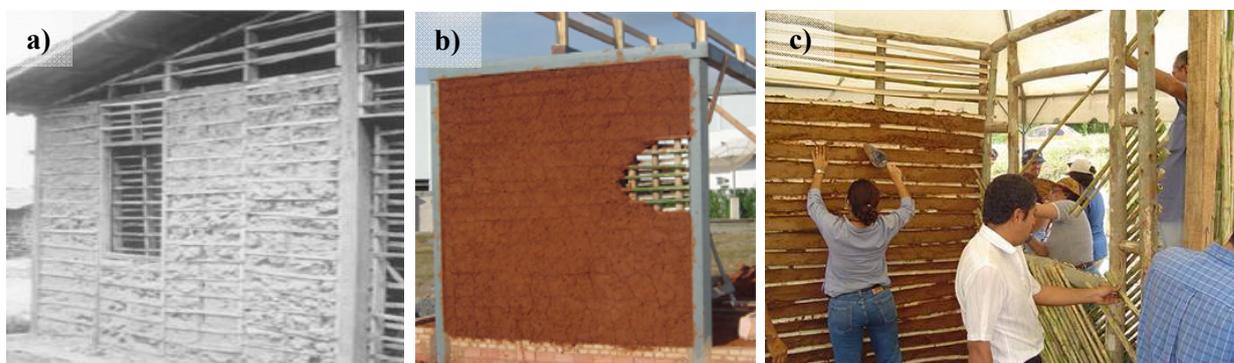


Figura 13. Construção em Taipa de Mão (MINKE, 2005; BARBOSA e GHAVAMI, 2007).

2.2.4. Blocos de Terra Comprimida

Os Blocos de Terra Comprimida, técnica conhecida na Europa desde o século XVIII, são produzidos pela deposição da mistura (solo-cimento) em uma fôrma e posterior prensagem. A mais conhecida prensa no mundo é a CINVA Ram desenvolvida na Colômbia pelo chileno Ramires, na década de 50 (figura 14a). Sua vantagem em relação ao Adobe é que esta técnica utiliza menor proporção de água, como conseqüência 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). As figuras 14b,c,d ilustram as etapas de assentamento dos blocos.

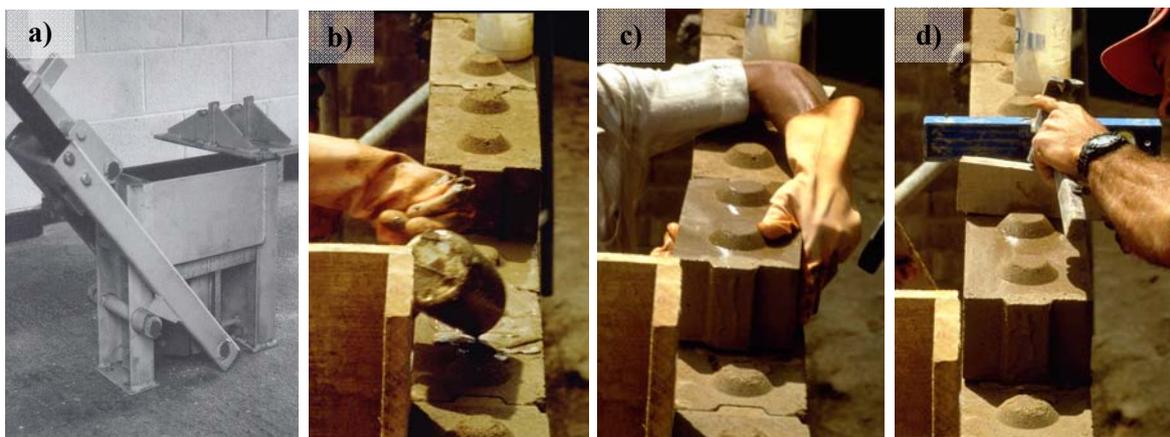


Figura 14. Máquina manual para a produção de blocos de terra comprimida e etapas de construção. a) CINVA-Ram, b) colocação da argamassa, c) assentamento do bloco, d) nivelamento e prumo. (KEEFE, 2005; BARBOSA e GHAVAMI, 2007).

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 (BARBOSA, 2003). Reddy e Gupta (2005) sugerem como mais indicados os solos arenosos que contenham predominantemente argila não expansiva (caolinita), 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 adicionado ao solo trabalha 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.

2.3. 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. No caso das alvenarias é necessário melhorar a resistência mecânica e a resistência à ação da água. 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 além de custos para sua manutenção. A estabilização pode ser do tipo mecânico, físico, químico, elétrico ou térmico. 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 dissertação.

2.3.1. Estabilização Mecânica

O método de estabilização aumenta, através de meios mecânicos, a densidade do solo, melhorando sua resistência e durabilidade. O aumento da densidade é obtido pela redução dos vazios da mistura, através da energia imposta. Com o aumento da compactação, tem-se o acréscimo da resistência mecânica. A redução dos poros também inibe a percolação da água e a erosão provocada pela mesma, aumentando a durabilidade. Em relação ao conforto térmico e acústico, tem-se observado enormes ganhos simultaneamente ao aumento da densidade, também proporcionado pela redução dos vazios.

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).

Estudando a estrutura do solo formada nos ramos seco e úmido da curva de compactação, Seed e Chan (1959), observaram que uma pequena quantidade de água resulta em alta concentração de eletrólitos, que formam uma dupla camada de íons ao redor de cada partícula de argila. Esta dupla camada conduz a uma baixa repulsão inter-partícula, tendendo à floculação. Como consequência tem-se um baixo grau de orientação entre as partículas de argila do solo compactado. A este tipo de estrutura dá-se o nome de arranjo floculado. Quando a quantidade de água é aumentada, a concentração de eletrólitos reduz, resultando em expansão da dupla camada, acrescentando o grau de orientação das partículas. A este sistema é dado o nome de dispersivo. Assim, a compactação de um solo, com baixa quantidade de água, produzirá arranjo floculado (não alinhado) das partículas de argila. Em contraposição, conforme a quantidade de água é acrescida, o grau de alinhamento aumenta, e a este estado de organização das partículas de argila, denomina-se arranjo dispersivo.

A natureza do carregamento de compactação também influencia na densidade seca e conseqüentemente no teor de umidade ótima. No geral, a estabilização mecânica pode ser de natureza dinâmica ou estática. Bahar et al (2004), investigando os efeitos da combinação de estabilização química (cimento) e estabilização mecânica por compactação (dinâmica, estática e vibro-estática), observaram que os espécimes que apresentaram maior resistência à compressão, foram moldados com umidade no ramo ascendente da curva de compactação em comparação aos que permaneceram no ramo descendente. Os autores afirmam que tal comportamento é devido à elevada resistência no rearranjo das partículas de solo, já para o ramo descendente (ramo úmido) as partículas se arranjam mais facilmente. Estas informações podem indicar que, em relação à resistência a

compressão simples, a estrutura floculada das partículas de argila do solo é mais conveniente.

A busca por métodos de ensaios capazes de representar, em laboratório, as condições vividas em 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 utilizadas para a produção de Blocos de Terra Comprimida, através de sistemas de alavanca, aplicam um carregamento quase 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 estática.

Mesbah et al (1999) demonstram um método de compactação estática, 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.

2.3.2. 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.

Para o caso da correção granulométrica de solos, a forma, tamanho e distribuição das partículas são os parâmetros de influência. Barbosa e Souza (2000) estudaram a estabilização granulométrica de dois solos de características predominantemente arenosa, adicionando-lhes um terceiro solo argiloso. Os ensaios de compressão simples foram realizados por meio de Blocos Comprimidos de Terra. Os resultados indicam que os solos arenosos, que normalmente não seriam capazes de compor blocos comprimidos, podem fazê-lo, desde que a correção granulométrica proporcione uma porcentagem de finos suficiente para dar-lhes a coesão necessária. Bahar et al (2004) observam que a correção granulométrica influi positivamente para a redução da taxa de retração, pois quando combinada com a estabilização química, obtêm-se menores índices de retração.

Quanto à inserção de reforço fibroso em elementos de terra, embora existam registros de sua utilização no Antigo Egito e em Roma (AGOPYAN, 1991), pesquisas podem ser consideradas como escassas e ainda pouco se conhece sobre seus efeitos, em detrimento da variabilidade dos solos e fibras. Sabe-se que, na adição de fibras (fase dispersiva), a incompatibilidade física e/ou química é mais acentuada, particularmente, para as fibras vegetais. A fase matriz possui muitas funções, primeiramente envolve (agrupa) a fase dispersiva sendo responsável pela distribuição dos esforços. Uma segunda função é proteger as fibras quanto ao ataque ambiental, porém, um dos fundamentos básicos do estudo de materiais e tecnologias não-convencionais, demonstra a sensibilidade das fibras vegetais à alcalinidade de matrizes cimentícias (incompatibilidade química). Finalmente, a matriz separa as fibras e em virtude desta característica, previne criando barreira para a propagação de fissuras.

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.

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, atentando ao fato, do aumento concomitante da retração por secagem pela inserção volumétrica. A adição do reforço fibroso cria canais que facilitam a saída da água dos compósitos, aumentando a incidência de regiões com fissuras.

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 acrescenta fibras vegetais há a necessidade de se aumentar a quantidade de água em razão das propriedades higroscópicas das fibras. Porém, o aumento da quantidade de água ocasiona o decréscimo da densidade e conseqüentemente da resistência dos Adobes. Os solos arenosos com maiores quantidades de fibras demonstraram-se 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.

A resistência de tijolos e alvenarias monolíticas reforçados depende do tipo e quantidade de fibras adicionadas, existindo uma porção dita “ótima” que não deve ser excedida. Isto é justificado, uma vez que, uma grande quantidade de fibras diminui a densidade, enquanto o número de áreas (pontos) de contato entre fibra e solo decai, reduz a resistência do elemento de terra. Houben e Guillaud (1994) sugerem uma proporção mínima de 4% de fibras, em volume. Porém, contestando os autores, uma análise mais cuidadosa deve levar em conta o tipo de fibra empregada, a técnica construtiva, o uso da construção, a técnica de processamento de mistura, condições a que as fibras estarão submetidas, entre outros. Neste trabalho avaliou-se a inserção de 0,5% e 1% de fibras, em peso seco de solo, visto que a adição em volume é pouco precisa.

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 macrofibrila. 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 cimentadas dentro da planta por lignina (ARSÈNE et al, 2003). A estrutura de uma microfibrila 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. A camada S3 é a mais interna, tendo 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 (PICANÇO, 2005).

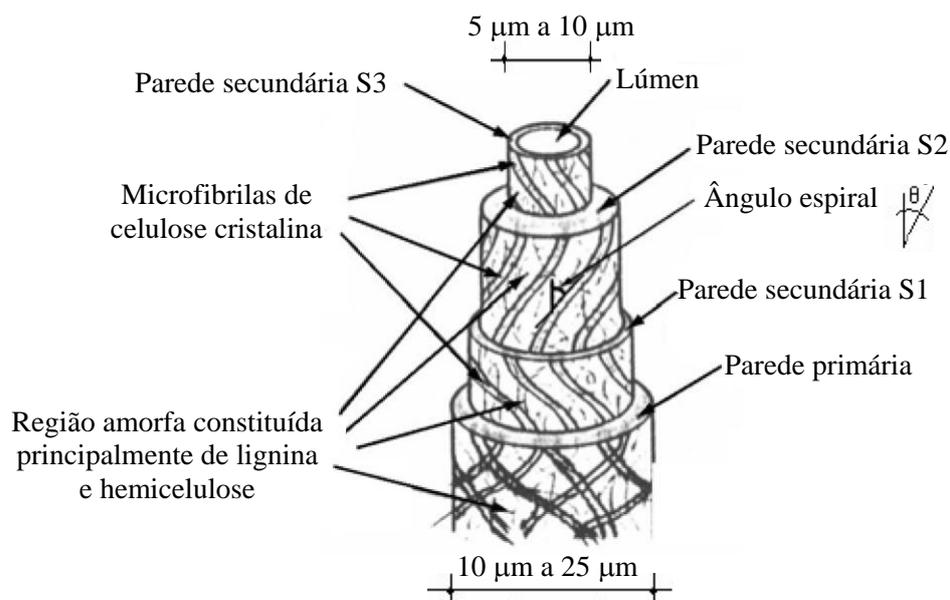


Figura 15. Estrutura de uma microfibrila vegetal.

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 mesmo para fibras de

mesmo tipo. A tabela 4 demonstra a composição química das fibras de banana e coco, segundo sua localização na planta.

Tabela 4. Composição química das fibras vegetais, em % (ARSÉNE et al, 2003).

Natureza da fibra	Lignina	Celulose	Hemicelulose	Extrativos	Outros
Folha da bananeira	24,84	25,65	17,04	9,84	22,63
Caule da bananeira	15,07	31,48	14,98	4,46	34,01
Coco (fruto)	46,48	21,46	12,36	8,77	10,93
Folha do Coqueiro	29,70	31,05	19,22	1,74	18,29

A variabilidade da composição química das fibras vegetais influencia diretamente a 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).

A formação da zona de transição é conduzida por características intrínsecas das fibras vegetais, como o índice de absorção d'água, a morfologia, a rugosidade e a porosidade. Estudos indicam que fibras com altos índices de absorção apresentam uma zona de transição mais espessa. A alta taxa de absorção das fibras vegetais inibe o chamado efeito parede, e produz um forte fluxo de água em direção às fibras, induzindo ao aumento da relação água/cimento. Isto pode vir a produzir o efeito de enrijecimento da fibra após a hidratação, além do acúmulo de cristais de portlandita sem arranjo definido, criando uma região frágil (SAVASTANO e AGOPYAN, 1999). O comportamento das fibras vegetais inseridas em uma matriz de solo é ilustrado na figura 16.

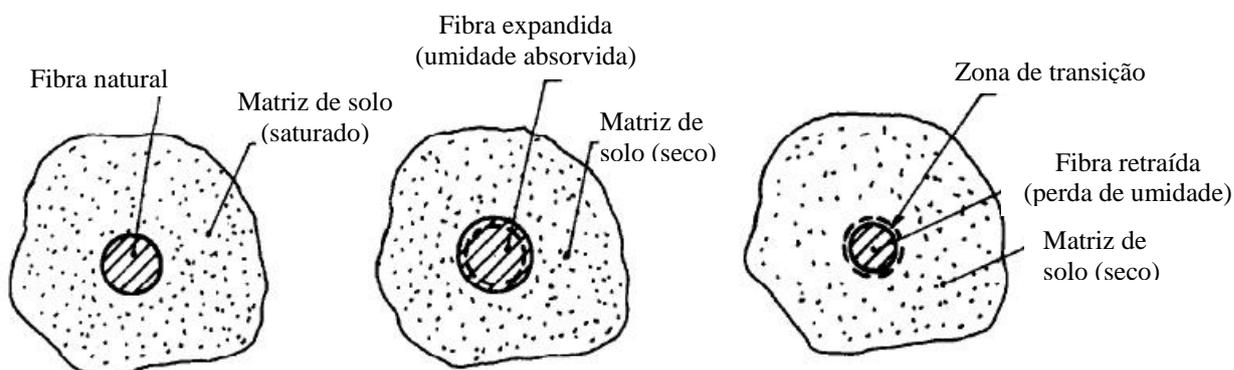


Figura 16. Interação fibra/matriz de solo (GHAVAMI et al, 1999).

Com o intuito de minimizar o efeito negativo proporcionado pela alta atividade higroscópica das fibras vegetais, Ghavami et al (1999), estudando tipos de tratamento, observaram que o tratamento com substâncias hidrofugantes, reduziu a espessura da zona interfacial, melhorando a aderência entre fibra e matriz, além da efetiva proteção das fibras contra a alcalinidade da água do poro das matrizes cimentícias.

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 microflambagem, 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).

Com a melhoria do desempenho da zona de transição, consegue-se promover o trabalho solidário entre as duas fases, através de uma maior e melhor aderência. Acrescenta-se ainda, o aumento de resistência mecânica dos compósitos através do aproveitamento mais eficiente da capacidade de carga das fibras. Em contrapartida, uma zona interfacial mais fraca favorece a absorção de energia (tenacidade) pós-pico através do arrancamento da fibra. Assim, compósitos com baixa aderência são mais tenazes e menos resistentes à compressão simples.

Sales (2006) explica que, em um compósito sob tensão, as fissuras começam a se propagar pela matriz. Quando a fissura se aproxima da fibra a propagação se interrompe momentaneamente (figura 17a), em detrimento da zona interfacial. Sendo a interface uma zona de baixa resistência (comparada à resistência da matriz e fibra), o cisalhamento interfacial e a contração lateral da fibra e matriz – provocados pela tensão atuante –, resultam no descolamento e deflexão da fissura na direção normal à interface (figura 17b). Neste momento parte do carregamento é absorvido pela deformação da fibra e ruptura dos pontos de contato da zona de transição (figura 17c). Com o aumento da tensão, pode ocorrer o descolamento e/ou ruptura da fibra (figura 17d).

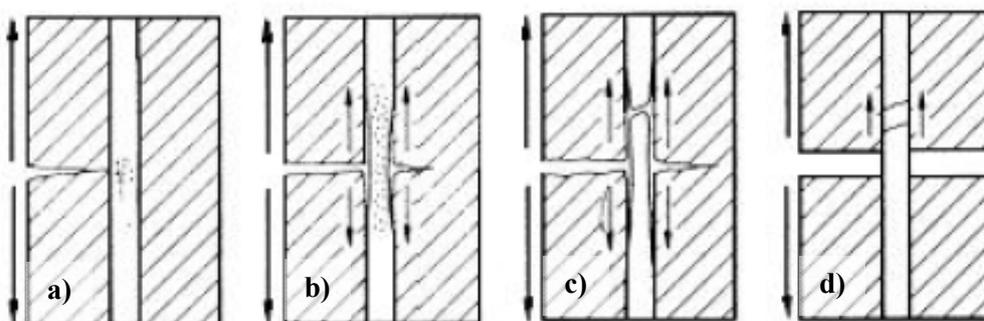


Figura 17. Mecanismo de propagação da fissura (CHAWLA, 1987 apud SALES, 2006).

Segundo Harmia (1996, apud SILVA, R., 2003) o descolamento das fibras ocorre geralmente quando as fibras estão orientadas paralelamente à direção da propagação da trinca, nas fibras orientadas perpendicularmente, são observados com maior frequência o deslizamento e fratura das mesmas. Para ambos os mecanismos, o comprimento da fibra exerce significativa influência. Neste trabalho, a influência do comprimento de ancoragem foi determinada com fibras com comprimento de 25 mm e 35 mm.

Morrissey et al (1985, apud SAVASTANO, 1992) estudaram o comprimento crítico (comprimento em que as fibras rompem antes de escorregar) para fibras vegetais em matriz de pasta de cimento. Os autores concluíram que a resistência de aderência das fibras não é proporcional ao comprimento de ancoragem e depende, sobretudo, de pontos localizados onde a aderência é maior. Assim, comprimento crítico deve ser considerado comprimento em que se torna maior a probabilidade de ocorrência de ancoragem localizada e de alta resistência ao cisalhamento.

2.3.2.1.

Agave sisalana – Sisal

Li et al (2000) comentam 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. Em 2000 eram produzidos 4,5 milhões de toneladas anualmente no mundo, sendo o Brasil um dos maiores produtores. Dados da Embrapa (2007) indicam que a produção anual é de 140.000 toneladas. O cultivo se concentra na região Nordeste, sendo os estados da Bahia (36 municípios),

Paraíba (34 municípios) e Rio Grande do Norte (5 municípios) 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 pacotes de fibras, compostas por 4% de fibras, 8% de matéria seca e aproximadamente 90% de água. O processo de produção 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). Na tabela 5 tem-se a composição química das fibras de sisal. A figura 18 apresenta imagens em microscopia eletrônica de varredura da morfologia interna da fibra de sisal.

Tabela 5. Composição química das fibras de sisal, em %.

Natureza da fibra	Lignina	Celulose	Hemicelulose	Extrativos	Outros
Sisal ^a	11	73,11	13,33	1,33	1,23
Sisal ^b	26	38,2	26	--	9,8
Sisal ^c	8 - 11	67 - 78	10 - 14,5	--	4 - 7,5

^a Bledzki and Gassan (1999, apud ARSÈNE et al, 2003); ^b Ramakrishna e Sundararajan (2005); ^c Silva, A., (2003).

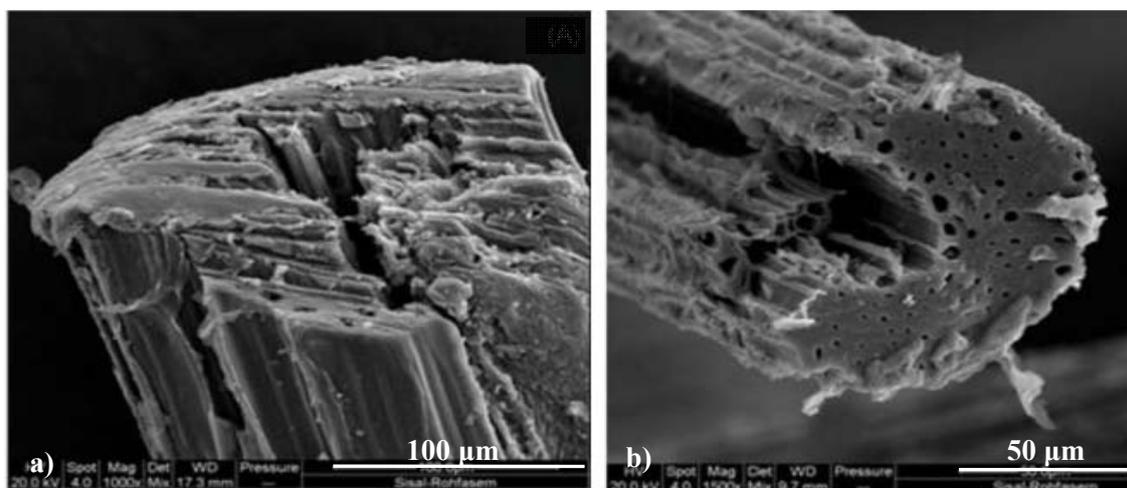


Figura 18. Microscopia eletrônica de varredura da morfologia interna da fibra de sisal (ANDRADE et al, 2007).

2.3.2.2.**Ananás erectifolius – Curauá**

Planta característica da Amazônia paraense, o curauá, pertencente à família das bromeliáceas, cujo nome científico, *Ananás erectifolius*, a identifica como sendo da família do abacaxi (*Ananás comosus*), é uma planta com grande potencial para o uso de suas fibras lignocelulósicas (d'ALMEIDA et al, 2006). O fruto é semelhante, em aspecto e sabor, ao abacaxi (LOBATO, 2003 apud PICANÇO, 2005). Embora comestível (figura 19a), o interesse econômico pelo curauá está primordialmente associado às fibras extraídas de suas folhas. A planta não possui espinhos o que facilita o corte e manejo. Suas folhas são rígidas eretas e com faces planas, medem de 4 a 5 cm de largura, 5 mm de espessura e 1,5 m de comprimento (PICANÇO, 2005; d'ALMEIDA, 2006). Espécie nativa e rústica, o curauá não é exigente quanto ao solo, crescendo até em solo arenoso e pouco fértil inclusive em área degradadas (RFI, 2006). Produtores colhem duas safras por ano do curauá nativo, onde cada planta produz entre 20 e 24 folhas. As fibras representam 6 e 8% da composição de cada folha, totalizando quase 2 quilos de fibras por planta.

A indústria automobilística utiliza o curauá para construção de freios e outras peças em substituição à fibra de vidro. Conforme apontado por d'Almeida et al (2006), as fibras picadas são misturadas com sobras de cobertores e tapetes descartadas pela indústria têxtil para reforçar matrizes de polipropileno, utilizados no teto e nas partes internas do compartimento de bagagem de automóveis.

Picanço (2005), utilizando as fibras de curauá em compósitos cimentícios, observou que os resultados de características físicas e mecânicas habilitam a utilização da fibra para o reforço de matrizes cimentícias, uma vez que, as fibras oferecem ganhos substanciais à ductibilidade e à capacidade de resistência pós-fissuração, em contraste a matrizes cimentícias não reforçadas. Na tabela 6 pode ser visualizada a composição química das fibras de curauá. As figuras 19b e 20a,b apresentam imagens em microscopia eletrônica de varredura das fibras de curauá.

Tabela 6. Composição química do curauá, em % (LEÃO et al, 2002 apud PAOLI, 2007).

Natureza da fibra	Lignina	Celulose	Hemicelulose	Extrativos	Outros
Curauá	7,5	73,6	9,9	--	9

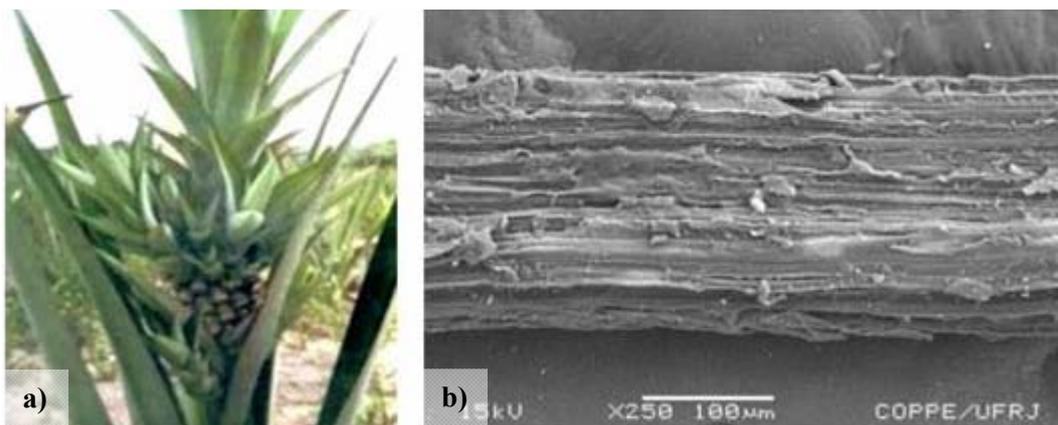


Figura 19. Planta e fibra da *Ananás erectifolius* – curauá (MONTEIRO et al, 2006).

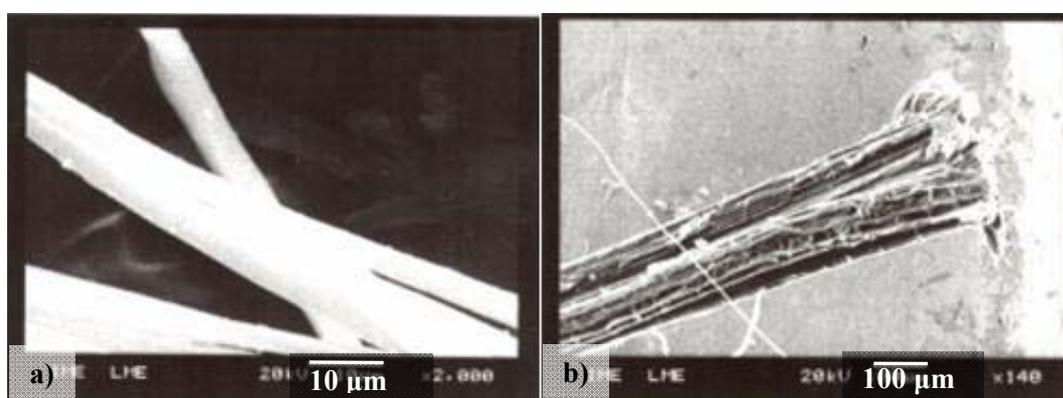


Figura 20. Microscopia eletrônica de varredura de fibras de curauá (PICANÇO, 2005).

2.3.3. Estabilização Química

A estabilização química dos solos refere-se às alterações produzidas em sua massa pela introdução de uma quantidade de aditivo. Quando utilizada para solos granulares 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, pozolanas, materiais betuminosos e certas resinas.

O estabilizante químico mais utilizado é o cimento, 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 ligando as juntas (COOK e SPENCE, 1983). Handy (1958, apud GRANDE, 2003) também observa 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. O melhor solo para estabilização é aquele que apresenta pequenas quantidades de argila, consistindo muitas vezes de areia e cascalho.

Walker (1995) observa que a resistência à compressão decresce com a redução do cimento e aumento do índice de plasticidade. A redução da resistência, devido à presença de argila, foi mais evidente em solos com plasticidade entre 15% e 25%. A queda de resistência é atribuída ao efeito enfraquecido da ligação da argila e cimento. 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, reduziram sua permeabilidade. Isto demonstra que a estabilização química conduz a uma melhor resistência mecânica e menor permeabilidade, proporcionando uma maior durabilidade. Os autores ainda observam um significativo decréscimo da retração, entre 20 e 44% para solos estabilizados com 6 e 10% de cimento, respectivamente.

Uma outra forma de estabilização química, embora não seja escopo desta dissertação, 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 economia energética, a reciclabilidade dos resíduos e a redução do custo de produção.