2
Revisão Bibliográfica

2.1.
Solos Reforçados - Histórico

O reforço de solos é uma técnica na qual se insere um material que possua alta resistência à tração, promovendo, então, uma melhoria nas propriedades mecânicas dos solos, aumentando a resistência e diminuindo a compressibilidade destes. O reforço de solos com fibras é uma técnica há muito tempo conhecida e empregada pela humanidade. Indícios do emprego desta técnica também são encontrados em partes da Grande Muralha da China e em estradas construídas pelos Incas, no Peru, empregando lã de lhama como reforço (Palmeira, 1992). Aplicações pioneiras do que mais se aproxima de um geossintético dos dias atuais foi a utilização de mantas de algodão, em 1926, pelo Departamento de Estradas da Carolina do Sul, Estados Unidos, como reforço de camadas asfálticas em pavimentos (Palmeira, 1992). Inicialmente, diversos artigos foram publicados com o intuito de avaliar o efeito de raízes de plantas na resistência ao cisalhamento dos solos, dentre estes estão os trabalhos de Kaul (1965 apud Schaefer et al., 1997), Endo & Tsuruta (1969 apud Schaefer et al., 1997) e Gray & Ohashi (1983). Além de evidenciar a contribuição positiva de raízes de plantas para a resistência ao cisalhamento dos solos foi comprovado também que estas contribuíam também para a estabilidade dos taludes. Baseando-se nos princípios de reforço que as raízes de plantas introduziam ao solo, foram desenvolvidas técnicas que atuassem da mesma maneira. Em 1966, Vidal patenteou a técnica denominada “Terra Armada”, na qual o reforço foi alcançado através da introdução de tiras metálicas e painéis de concreto que constituíam a face do maciço (Ferreira, 2010). A partir de então foram se desenvolvendo técnicas de estabilização de solos com a adição de novos materiais combinados com a compactação. Dentre estas técnicas pode-se destacar a estabilização utilizando cal e cimento, injeção de materiais estabilizantes, utilização de colunas de brita ou areia, pré-carregamento e emprego de drenos verticais, reforço com tiras metálicas ou geossintéticos etc.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112042/CA

2.2.
Materiais Compósitos Reforçados com Fibras

Um material compósito pode ser definido como a associação de dois ou mais materiais com características distintas, que quando unidos, possuem propriedades distintas das que possuíam individualmente. São constituídos por duas fases: a matriz (solo, concretos, silicones, argamassas, etc.) e o elemento de reforço (fibras, papéis, aço, fragmentos de borracha, isopor, etc.). São elaborados para otimizar os pontos fortes de cada uma das fases (Budinski, 1996). Um exemplo deste tipo de reforço foi o utilizado em um compósito estudado por Ramírez (2012), no qual o autor estudou a influência da resistência ao cisalhamento de dois diferentes tipos de solo, uma areia e um solo maduro argilo-arenoso de origem coluvionar (matriz), reforçados com borracha moída de pneus inservíveis (reforço granular), com diâmetro médio de 1,0mm.

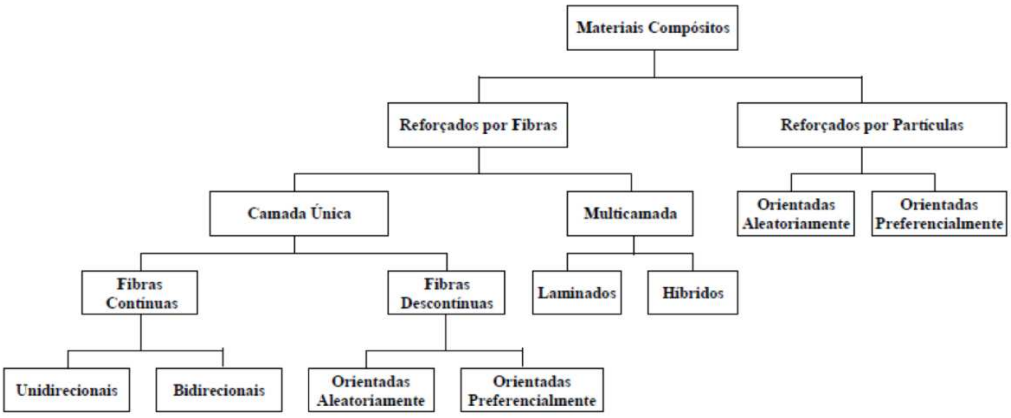

Figura 2.1 – Classificação de materiais compósitos (Matthews e Rawlings, 1994).

Budinski (1996) afirma que os materiais compósitos mais importantes são combinações de polímeros e materiais cerâmicos. Os produtos baseados em cimento Portland por exemplo podem ser considerados materiais cerâmicos uma vez que possuem características comuns a esse grupo de materiais, tais como alta rigidez, fragilidade, baixa resistência à tração e tendência de fissuração por secagem.

Para Hannant (1994) se tratando de compósitos fibrosos, fatores como o teor de fibra presente, o comprimento das fibras, as características do solo, aderência entre matriz e reforço e orientação e distribuição das fibras na matriz, são determinantes para o desempenho do compósito já que isso implica na forma com

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112042/CA

a qual as fibras atuam controlando a abertura e o espaçamento entre as fissuras que se formam devido a tensão desviadora atuando no solo, distribuindo de forma mais uniforme as tensões dentro da matriz.

Para Taylor (1994) e Hannant (1994) a maior contribuição que as fibras conferem como elemento de reforço se dá após o surgimento das fissuras no compósito, uma vez que a partir deste momento, as fibras começam a trabalhar contribuindo com o aumento da resistência ao cisalhamento do material, melhorando, portanto a capacidade de absorção de energia. Segundo Taylor (1994) para que haja um aumento de resistência pré-fissuração de um compósito, é preciso o emprego de fibras que apresentem uma maior rigidez, mais rígidas que a matriz. É preciso também que exista uma boa aderência entre as fases (reforço e matriz) impedindo que ocorra deslocamentos relativos entre as partes. Estes autores acreditam que de um modo geral, as fibras não impedem a formação das fissuras devido a atuação de tensões desviadoras, mas sim, evitam a sua propagação (aumento da tenacidade), graças a capacidade da fibra de conferir resistência a tração.

Para Johnston (1994) as fibras em uma matriz cimentada contribuem com dois efeitos importantes na melhoria das propriedades do compósito. Elas tendem a reforçar o compósito sobre todos os modos de carregamento que induzem tensões de tração, isto é, tração indireta, flexão, e cisalhamento. Além disso, melhoram a ductilidade e a tenacidade de uma matriz com características frágeis. A orientação e distribuição das fibras na matriz também tem grande influência. A orientação de uma fibra com respeito ao plano de ruptura, implica nas possibilidades que esta tem de contribuir com a transferência de cargas. Uma fibra que se posiciona paralela ao plano de ruptura não tem efeito, por outro lado, uma fibra que se posiciona perpendicular a este plano contribui integralmente com sua capacidade de resistir a tração.

Illston (1994) e Taylor (1994) apresentam um equacionamento do equilíbrio de forças idealizado no momento em que a fibra é solicitada no compósito, como demonstra a Figura 2.2.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112042/CA

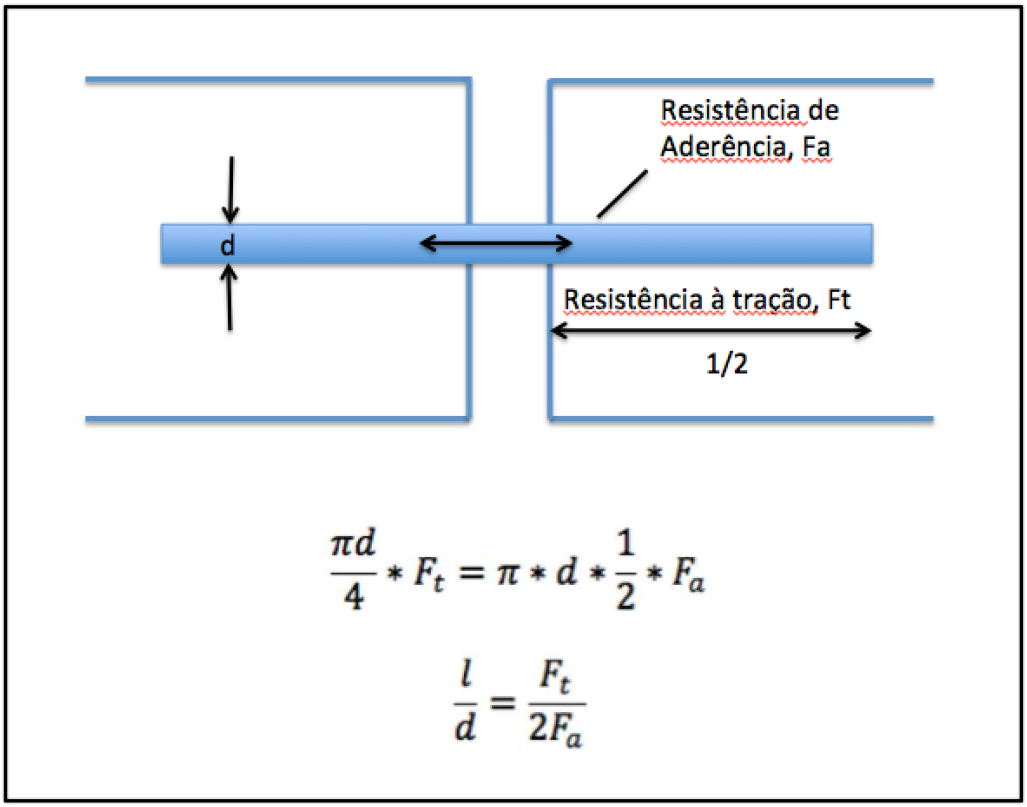

Figura 2.2 - Disposição fibra/fissura idealizada (Taylor, 1994)

Para Coelho (2008) existem duas etapas distintas que regem o comportamento mecânico de compósitos reforçados com fibra. A primeira é uma etapa de mobilização do conjunto matriz–fibras em que predomina a ação da matriz. A segunda é uma etapa em que os mecanismos de interação são condicionados pela presença das fibras.

Abaixo, segue uma lista com conclusões de diversos pesquisadores sobre a influências dos principais parâmetros relacionados ao comportamento de compósitos reforçados com fibras. Algumas controvérsias com respeito a esses parâmetros pode ser observada entre as conclusões de alguns autores. Entretanto, há que se levar em conta a diferença entre a natureza das fibras e das matrizes utilizadas nos diferentes trabalhos, o que pode explicar tais divergências:

- Teor de fibra: quanto maior for o teor de fibra, maior será o ganho de resistência mecânica, até um certo ponto, a partir do qual este ganho não será mais observado. Em outras palavras, existe um teor ótima de fibra que

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112042/CA

confere a melhor resistência (Gray e Ohashi, 1983; Gray e Al-Refeai, 1986; Mc Gown et al., 1988; Maher e Ho, 1994; Ulbrich, 1997; Specht, 2000; Santoni et al., 2001; Casagrande, 2001; Vendruscolo, 2003; Consoli e Casagrande, 2007)

- Orientação das fibras: os elementos de reforço devem estar posicionados na direção das deformações de tração do solo (Mc Grown et al., 1978; Morel e Gourc, 1997; Fatani et al., 1991; Diambra 2010); fibras distribuídas aleatoriamente mantém a resistência isotrópica, não sendo observados planos potenciais de fragilidade (Gray e Al-Refeai, 1986; Gray e Maher, 1989).

- Módulo de elasticidade da fibra: fibras com módulo de elasticidade baixo comportam-se como reforços idealmente extensíveis (Gray e Ohashi, 1983; Specht, 2000); fibras com módulo baixo não contribuem para o aumento da resistência mecânica (Montardo, 1999; Specht, 2000); quanto maior o módulo maior a probabilidade de haver o arrancamento das fibras (Shewbridge e Sitar, 1990).

- Aderência entre a fibra e a matriz: as características de resistência, deformação e padrões de ruptura de uma grande variedade de compósitos reforçados com fibras dependem fundamentalmente da aderência fibra/matriz (Casagrande, 2005). As fibras devem estar bem aderidas à matriz do compósito para que sua resistência à tração seja mobilizada (Taylor, 1994).

- Comprimento da fibra: quanto maior for o comprimento das fibras, maior será o ganho de resistência mecânica, até um limite assintótico (Gray e Ohashi, 1983; Ulbrich, 1997; Santoni et al.; 2001; Heineck, 2002; Vendruscolo, 2003); além disso menor será a possibilidade delas serem arrancadas (Casagrande, 2005).

- Resistência da fibra: aumentando a resistência das fibras, aumenta-se também a ductilidade do compósito, assumindo que não ocorra o rompimento das ligações de aderência. A resistência necessária dependerá,

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112042/CA

na prática, das características pós-fissuração necessárias, bem como do teor de fibra e das propriedades de aderência fibra-matriz (Casagrande, 2005).

2.3. Tipos de Fibras Empregadas como Reforço

Existe atualmente uma ampla variedade de fibras disponíveis para serem utilizadas como reforço de solos. As particularidades, características e comportamento de cada uma, bem com suas propriedades físicas, químicas e mecânicas, estão em função do material de que são feitas e da forma como são produzidas, influindo diretamente no comportamento do compósito no qual elas são empregadas.

Para que se obtenha o efeito esperado com respeito ao mecanismo de interação entre o reforço (fibra) e a matriz, e a contribuição de cada uma das fases no comportamento mecânico do compósito em questão, é indispensável que se adote uma fibra com as propriedades adequadas para determinada função.

É importante, portanto que se conheça as características e os diferentes tipos de fibras utilizados como elemento de reforço em materiais compósitos fibrosos.

Este tópico abordará os diferentes tipo de fibra utilizado em compósitos, separando-os em sub-tópicos conforme sua origem: poliméricas, minerais, metálicas e naturais.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112042/CA

2.3.1. Fibras Minerais

Fibras minerais

Dentre as fibras minerais mais utilizadas na construção civil poderíamos citar as de carbono, vidro e amianto (também conhecidas como asbestos), apresentadas a seguir:

- **Fibras de Carbono:** baseada na resistência das ligações entre os átomos de carbono e na leveza dos mesmos. Possuem alta relação resistência/peso próprio, elevada rigidez, boas propriedades elétricas e estabilidade dimensional, além da resistência química e à corrosão elevada. As fibras de

carbono apresentam alta resistência à tração e módulo de elasticidade em torno de 420 GPa. Tais características tornam imprescindível uma grande aderência entre a matriz e as fibras (Taylor, 1994).

- **Fibras de Vidro:** apresentam alta resistência mecânica e estabilidade dimensional, boas propriedades elétricas, alta resistência química e à corrosão, sendo resistentes ao ataque da maioria dos ácidos. Além disso, é um material não celular e de forma cilíndrica. Cerca de 99% das fibras de vidro são produzidas a partir do vidro tipo E, que é susceptível ao ataque dos álcalis.
- **Fibras de Amianto:** Também conhecidas como fibras de asbestos. Apresentam resistência à tração em torno de 1000 MPa e módulo de elasticidade em torno de 160 GPa. Seu diâmetro é muito pequeno, da ordem de 1 μm (Taylor, 1994). Esta fibra, quando cortada, libera partículas muito pequenas, em função do seu reduzido diâmetro, que danificam os alvéolos pulmonares se aspiradas pelo homem. Em função disso sua utilização na construção civil é proibida em muitos países.

A seguir, é apresentada a Tabela 2.2, com as principais propriedades físicas dos três tipos de fibras (Curcio, 2001).

Tabela 2.1 - Propriedades físicas e mecânicas das fibras minerais (Curcio, 2001)

Fibra	Densidade (kg/dm3)	Alongamento na ruptura (%)	Resistência. a tração (GPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Carbono	1,70 a 1,90	0,3 a 1,8	5,5	290 a 400
Vidro	2,5	5	1,50 a 4,50	87
Asbesto	2,5	0,62	1	160

2.3.2. Fibras Metálicas

As fibras metálicas mais empregadas em reforço de materiais compósitos são as fibras de aço. As fibras de aço utilizadas na construção civil apresentam fator de forma na faixa de 30 a 50, comprimento variando de 0,1 a 7,62 cm e diâmetro entre 0,13 e 0,9 mm. A ruptura do compósito é normalmente associada ao arrancamento da fibra e não à sua ruptura.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112042/CA

A resistência à tração da fibra é da ordem de 1100 MPa e o módulo de elasticidade é de 200 GPa. Podem apresentar problemas de corrosão em função do meio em que estão inseridas, o que pode ser minimizado com banho de níquel. Este tipo de fibra tem uma grande variedade de formatos para aumentar a resistência ao arrancamento (Taylor, 1994).

2.3.3. Fibras Poliméricas

Devido à estrutura química variada dos polímeros as fibras poliméricas podem ser consideradas as mais promissoras para o reforço de solos, pois dão origem a diferentes tipos de fibras.

As fibras poliméricas podem ser divididas em fibras de polipropileno, de polietileno, de poliéster e fibras de poliamida, descritas a seguir:

- **Fibras de Polipropileno:** as fibras de polipropileno são termoplásticas, ou seja, adquirem uma consistência plástica com o aumento da temperatura. Essas fibras possuem uma grande flexibilidade e tenacidade em função de sua constituição; seu módulo de elasticidade gira em torno de 8 GPa (menor que qualquer outra fibra) e sua resistência à tração é de aproximadamente 400 MPa. Além disso, possuem elevada resistência ao ataque de várias substâncias químicas e aos álcalis (Taylor, 1994).
- **Fibras de Polietileno:** as fibras de polietileno têm um módulo de elasticidade baixo, são fracamente aderidas à matriz cimentada e altamente resistentes aos álcalis. Apresentam alta durabilidade e grandes deformações de fluência, o que significa que, se elas forem utilizadas para suportar tensões altas permanentemente em um compósito fissurado, consideráveis elongações e deflexões podem ocorrer ao longo do tempo (Hannant, 1994). Procurando minimizar o problema da baixa aderência e módulo, foi desenvolvido o polietileno de alta densidade. Segundo Heineck (2002) o polietileno de alta densidade (PEAD), apresenta melhores características de aderência e mais alto módulo de elasticidade.
- **Fibras de Poliéster:** as fibras de poliéster apresentam alta densidade, rigidez e resistência, possuem um aspecto bastante similar às de

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112042/CA

polipropileno e podem ser utilizadas para as mesmas aplicações (Taylor, 1994). O polietileno tereftalato (PET) é o poliéster mais conhecido atualmente. É o material constituinte das garrafas plásticas. Apresenta alongamento na ruptura de 7% a 50% e densidade relativa entre 1,33 e 1,45. A temperatura de fusão é da ordem de 270°C (Mano, 1991).

- **Fibras de Poliamida (Kevlar):** As fibras poliméricas de alto módulo de elasticidade, foram desenvolvidas de poliamidas aromáticas e são chamadas de fibras de aramida e conhecidas comercialmente por Kevlar. As fibras de aramida são derivadas de moléculas de polímeros com alto grau de aromaticidade (contendo anéis de benzeno) os quais exibem comportamento de líquido cristalino em solução. As moléculas agem como barras rígidas que se alinham paralelamente umas às outras para formar domínios ordenados. Quando soluções destas moléculas são sujeitas ao cisalhamento, os domínios ordenados tendem a se orientar na direção do esforço (Hull e Clyne, 1996). As fibras de aramida são produzidas por extrusão e fiação. Quando a solução polimérica passa pelo processo de fiação desenvolve um alto grau de orientação e então podem alcançar valores de resistência e módulo de elasticidade elevados.

2.3.4. Fibras Naturais

Fibras naturais são estudadas há anos no que diz respeito à sua composição, às suas propriedades mecânicas e aos seus possíveis usos (Bledzki e Gassan, 1999; Sparniaš, 2006). Durante séculos elas foram utilizadas até que, gradativamente, elas começaram a ser substituídas por novas tecnologias. Todavia, a necessidade de se obter tecnologia sustentável faz com que o uso de fibras naturais se torne uma alternativa viável.

As fibras naturais são em sua maioria extraídas de vegetais (existem exceções, por exemplo, o cabelo humano é considerado uma vibra natural), obtidas em muitas regiões do planeta, em especial, na zonas tropicais dada a sua enorme biodiversidade. Elas podem ser classificadas conforme a origem de extração: folhas, frutos, caule e semente. Alguns exemplos de fibras naturais são citados na tabela 2.2, que apresenta a fibra, a espécie, bem como sua origem.

Há muitas formas de se extrair as fibras de um vegetal. Uma determinada

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112042/CA

forma pode ser aplicar a um tipo de fibra e não a outra. De fato, a forma de extração tem muito a ver com a parte da planta onde a fibra em que se tem interesse está localizada (folhas, frutos, talo) A tabela 2.2 explicita a parte do vegetal de interesse para a extração de fibras. No geral, os métodos manuais são os mais utilizados. Existem, porém, métodos mecânicos de extração pelo uso de máquinas chamadas de "decorticadores" que são utilizados para extrair fibras como banana, sisal, linho ou juta por exemplo. (Tomczak, 2010)

Tabela 2.2 - Lista de fibras naturais importantes e sua origem (Tomczak, 2010)

Fibra	Espécie	Origem
Abacá	Musa textilis	Folhas
Abacaxi	Ananus comosus	Folhas
Açaí	Euterpe oleracea	Frutos
Algodão	Gossypitum sp.	Sementes
Bamboo	(>1250 espécies)	Capim
Banana	Musa indica	Folhas
Cânhamo	Cannabis sativa	Caule/talo
Coco	Cocos nucifera	Frutos
Curauá	Ananas erectifolius	Folhas
Esponja	Luffa cylindrica	Frutos
Henequem (sisal mexicano)	Agave fourcroydes	Folhas
Juta	Corchorus capsularis	Caule/talo
Kenaf	Hibiscus cannabinus	Folhas
Linho	Limim usitatissimtum	Caule/talo
Piassava	Attalea funifera	Folhas
Ramie	Boehmeria nicea	Caule/talo
Sisal	Agave sisilana	Folhas

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112042/CA

As fibras vegetais podem diferir significativamente em sua aparência física mas elas possuem, entretanto, similaridades que as identificam como uma família. As características das fibras dependem das propriedades dos seus constituintes individuais, da estrutura fibrilar e da matriz lamelar. As fibras naturais são compostas de numerosas fibro-células alongadas fusiformes, que se adelgaçam de forma cônica na direção das extremidades (Figura 2.3). As fibro-células são unidas pelas lamelas médias as quais são constituídas de lignina, hemicelulose e pectina (Toledo Filho, 1997).

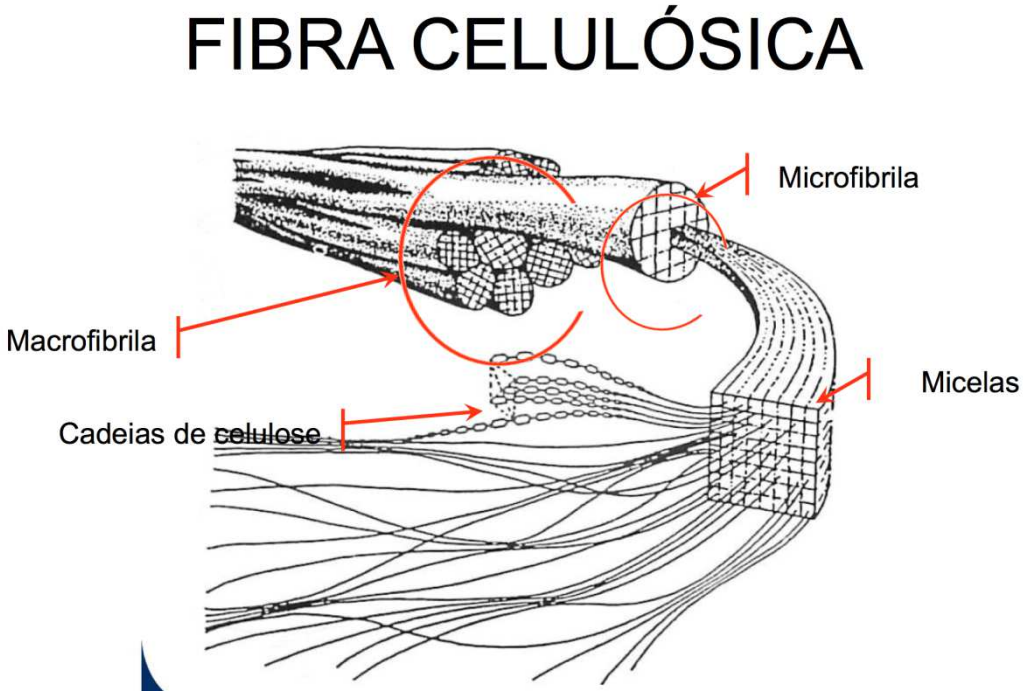

Figura 2.3 - Estrutura microscópica e submicroscópica da celulose

As fibras naturais consistem, basicamente, em carboidratos (celulose e hemicelulose), lignina, pectina e minerais (Passos, 2005).

A celulose pode ser considerada o componente principal e é o que mais influencia nas propriedades mecânicas das fibras. Ela é definida quimicamente como um polissacarídeo, composto de carbono, oxigênio e hidrogênio, cuja fórmula é $(C_6H_{10}O_5)_n$. A molécula $C_6H_{10}O_5$ representa na verdade a glicose, estrutura similar a um anel que pode ser vista repetida 3 vezes na figura 2.4. A celulose consiste por tanto em uma cadeia de moléculas de glicose interligadas por um átomo de oxigênio.

Durante o processo de formação da celulose, as ligações poliméricas formam longas cadeias de maneira que as moléculas ficam muito próximas através de longos segmentos, dando origem a fortes ligações químicas secundárias intermoleculares que são responsáveis pela grande resistência de materiais celulósicos (Tomczak, 2010).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112042/CA

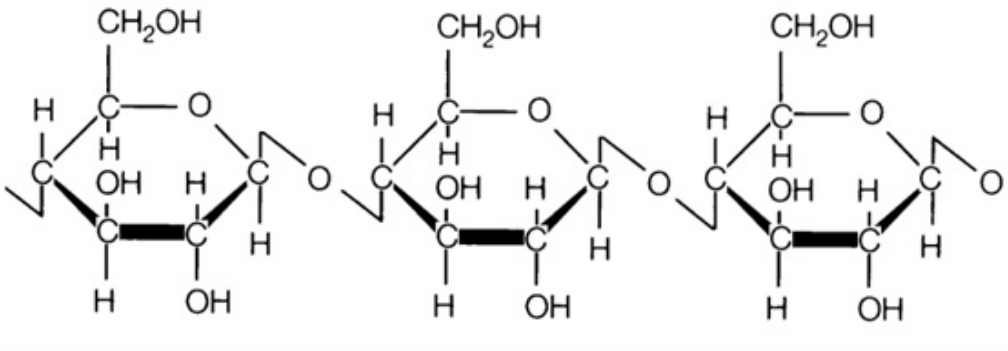

Figura 2.4 – Estrutura da celulose

As fibras celulósicas são encontradas em vários níveis de orientação, conforme ilustrado na Figura 2.5. Nos locais onde as moléculas se encaixam muito próximas, em longos segmentos, são desenvolvidas regiões cristalinas. (Tomczak, 2010).

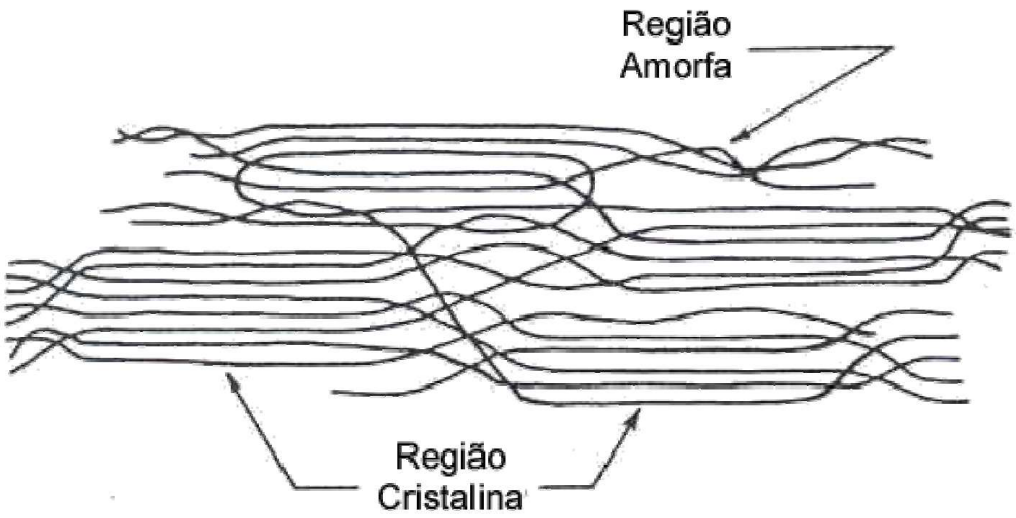

Figura 2.5 - Esquema de orientação molecular de uma microfibrila de celulose (Tomczak, 2010).

O grau de polimerização da celulose determina as propriedades dos materiais celulósicos. Celulose com cadeias longas são denominadas de α-celulose. Celuloses com graus de polimerização menores são categorizados como β-celulose (grau de polimerização entre 15 e 90) e hemicelulose (grau de polimerização menor que 15) As moléculas de α-celulose e das hemiceluloses crescem linearmente formando feixes denominados microfibrilas as quais se

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112042/CA

reúnem formando as fibrilas, que constituem a base da fibra.

Enquanto a celulose é uma estrutura composta apenas por um tipo de açúcar, a glicose, as hemiceluloses são polissacarídeos de massa molecular relativamente baixa, solúvel em água ou em soluções alcalinas, e compostas por cinco diferentes tipos de açúcares: manose, galactose, xilose, arabinose, além da própria glicose. Dependendo da espécie vegetal, estes açucares formam várias estruturas poliméricas que podem se associar com a porção de celulose ou com a lignina.

O termo holocelulose é usado para caracterizar toda a parcela de carboidratos existentes na fibra, ou seja, a celulose e a hemicelulose. Além da holocelulose, as fibras contêm uma espécie de resina denominada lignina (figura 2.6).

A lignina é, na verdade, um polímero com estrutura molecular complexa, amorfa, com constituintes aromáticos e alifáticos, que mantem as fibras celulósicas unidas tal como uma cola, formando assim a parede celular. Ela fornece resistência à compressão ao tecido celular e às fibras, enrijecendo a parede celular e protegendo os carboidratos (açúcares) contra danos físicos e químicos. Sua concentração nas fibras influencia a estrutura, as propriedades, a morfologia, a flexibilidade e a taxa de hidrólise. Segundo Passos (2005) fibras com alto teor de lignina serão de excelente qualidade e flexíveis. Como se verá mais a frente, a fibra de coco, material de estudo dessa pesquisa é talvez a fibra natural com a maior concentração de lignina, o que confere a ela propriedades únicas.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112042/CA

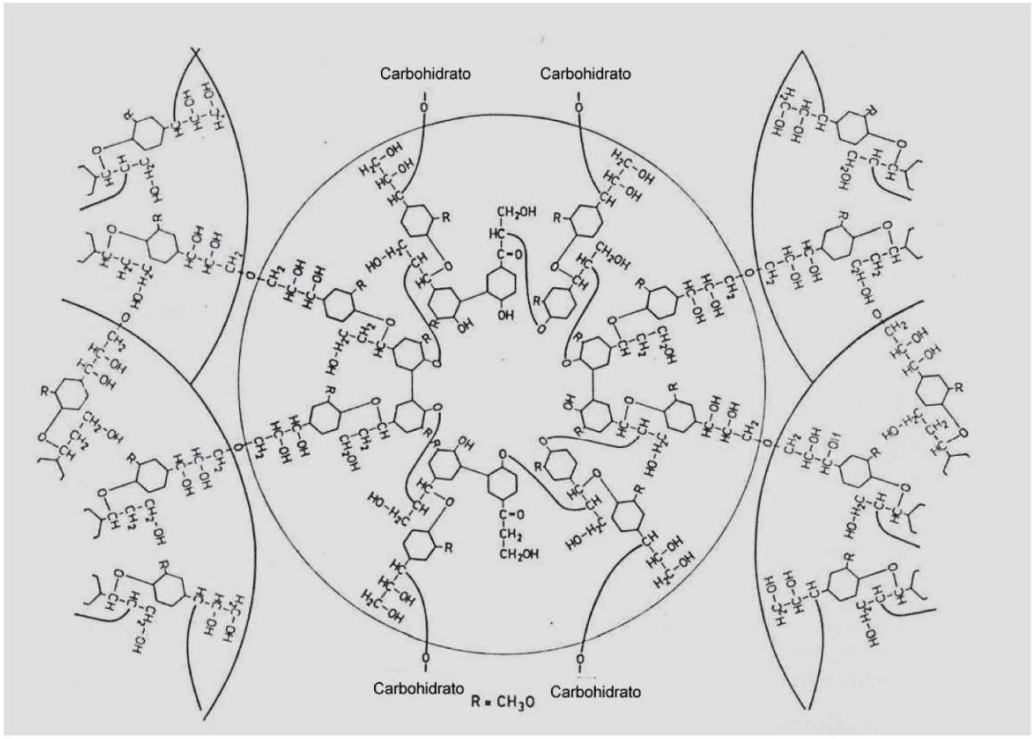

Figura 2.6 - Representação bidimensional da lignina (Tomczak 2010)

A pectina, outro componente das fibras vegetais, é um polissacarídeo rico em ácido galacturônico, presente nas paredes celulares e com função aglutinante. Já os componentes minerais são os responsáveis pela formação das cinzas após a incineração das fibras (Passos, 2005).

Além da holocelulose e da lignina, outras substâncias podem estar presentes nas fibras naturais, por exemplo, resinas ácidas, ácidos graxos e álcoois. Muitas delas são solúveis em água ou solventes orgânicos neutros. São denominadas de extrativos. As composições químicas de diferentes fibras naturais estão mostradas na Tabela 2.3.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112042/CA

Tabela 2.3 - Composição química típica de fibras naturais (Tomczak, 2010)

Fibra	α-celulose	Hemi-celulose	Lignina	Cinzas	Extrativos
Abacaxi	80 - 83	-	12	0,1 - 1	4
Bagaço de Cana	54,3 -55,2	16,8 - 29,7	24 - 25	1,1	0,7 - 3,5
Bambu	33 - 45	30	20 - 25	-	-
Banana	60 - 65	6,0 - 8,0	05/out	1,2	-
Coco	43,4 - 53	14,7	38 - 40	-	3,5
Curauá	70,7 - 73,6	21,1	08 - 11	0,8 - 0,9	2,5 - 2,8
Luffa Cylindrica	62	20	11	0,4	3,1
Piassava	31,6	-	48	-	-
Rami	80 - 85	3,0 - 4,0	0,5	-	6,4
Sisal	60 - 75,2	10 -15	07 - 12	0,14 - 0,87	1,7 - 6,0

A estrutura cristalina das fibras naturais consiste de microfibrilas de celulose que são conectadas pela região amorfa composta por lignina e hemicelulose formando células. Estas células diferem em suas composições químicas, e em seu ângulo helicoidal das microfibrilas. Este conjunto de parâmetros determina as propriedades mecânicas das fibras. Os ângulos helicoidais de algumas fibras são mostrados na Tabela 2.4. Uma representação das longas fibras cristalinas na forma de espirais helicoidais dispersas em uma região amorfa está ilustrada na Figura 2.7.

Tabela 2.4 - Ângulos helicoidais de algumas fibras (Tomczak, 2010)

Fibra	Ângulo helicoidal (°)
Banana	11
Coco	45
Juta	8
Linho (flax)	10
Rami	7,5
Sisal	20

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112042/CA

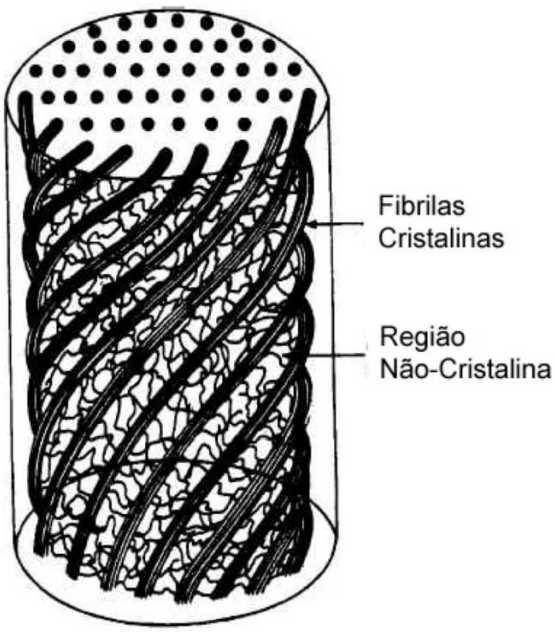

Figura 2.7 - Arranjo helicoidal das fibras de celulose nas fibras naturais (Tomczak, 2010)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112042/CA

As propriedades mecânicas das fibras naturais são influenciadas por vários fatores, como local de origem (clima), maturação (idade), espécie, método de extração, tipo de celulose (α-celulose, β-celulose), quantidade de celulose e ângulo helicoidal.

Fibras como as de juta, linho, rami, sisal possuem altos percentuais de celulose, sendo indicadas para uso como material de reforço em compósitos. As fibras de juta, sisal e coco apresentam também altos teores de lignina, o que lhes confere um fortalecimento adicional das ligações internas dos compósitos, principalmente aqueles submetidos a processos de aquecimento, caso dos compósitos que utilizam material cimentante (Tomczak, 2010).

As fibras das cascas de coco, objeto de pesquisa deste trabalho, embora tenha um percentual menor de celulose, possui um teor de lignina altíssimo, cerca de duas a quatro vezes os valores existentes para a juta e o sisal, o que lhe outorga um comportamento único em comparação com as demais fibras.

Outras fibras que são subprodutos da agricultura, tais como forragem de milho, folha de abacaxi, bagaço de cana, folha de bananeira, palha de trigo e de arroz, talo de sorgo e palha de cevada, pode-se destacar o fato de terem, no geral, concentrações maiores de hemicelulose e lignina do que as fibras convencionais, e

também possuem qualidades que lhe conferem a possibilidade de serem empregadas em diversos usos. Com relação ao teor de celulose, as fibras de folhas de abacaxi e de bananeira possuem percentuais compatíveis com as fibras convencionais conferindo-lhes potencial para serem usadas como reforço em compósitos.

As propriedades das fibras naturais dependem, principalmente, de sua composição química. Deve-se salientar que devido ao fato de ser um material natural, cultivado, diversos fatores influem em suas características, tais como a localidade onde foi produzida, o clima, a variedade da fibra, as propriedades do solo, a forma como foi cultivada, a maturação, entre outros. Uma das diferenças entre a engenharia civil estrutural e a geotécnica é que, enquanto a primeira se baseia em materiais construídos pelo homem e por tanto, com suas propriedades constantes e bem definidas, a segunda trabalha com solos e rochas, materiais feitos pela natureza, os quais não apresentam propriedades constantes. Tal como acontece com o material geotecnico, esses tipos de fibras, por serem elementos naturais, não apresentam uma uniformidade em suas propriedades como ocorre com as fibras sintéticas. Segundo (Bledzki; Gassan, 1999 e Sparniaš, 2006), a composição química, cristalinidade, propriedades de superfície, diâmetro transversal, forma, tamanho, força e rigidez podem variar de fibra para fibra.

Segundo Thakur e Singha (2010) as propriedades mecânicas das fibras dependem de fatores como a percentagem de celulose, o grau de polimerização da celulose e o ângulo microfibrilar. Fibras com alta percentagem de celulose, alto grau de polimerização e baixo ângulo microfibrilar apresentam uma maior resistência à tração. Essas fibras apresentam variações nas propriedades mecânicas, tanto ao longo do comprimento da fibra quanto entre as fibras.

Segundo Santos (2006), um critério para a escolha do tipo adequado de fibra é o seu módulo de elasticidade. A Tabela 2.5 (Bledzki; Gassan, 1999) apresenta algumas propriedades mecânicas de diversas fibras sintéticas e naturais. Os valores característicos das fibras naturais são bem inferiores aos encontrados para as fibras de vidro (E-vidro) e de carbono. Contudo, como a densidade da E-vidro é cerca de 45% maior que as demais, pode-se dizer que as fibras naturais apresentam valores de propriedades mecânicas comparáveis a E- vidro.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112042/CA

Tabela 2.5 - Propriedades mecânicas de fibras vegetais e de fibras convencionais usadas como reforço (Bledzki e Gassan, 1999)

Fibra	Densidade (g/cm3)	Alongamento (%)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
Coco	1,2	30	175	4,0 - 6,0
Algodão	1,5 - 1,6	7,0 - 8,0	287 - 597	5,5 - 12,6
Juta	1,3	1,5 - 1,8	393 - 773	26,5
Linho	1,5	2,7 - 3,2	345 - 1035	27,6
Cânhamo	-	1,6	690	-
Rami	-	3,6 - 3,8	400 - 938	61,4 - 128
Sisal	1,5	2,0 - 2,5	511 - 635	9,4 - 22,0
Kraft	1,5	-	1000	40
E-vidro	2,5	2,5	2000 - 3500	70
Carbono padrão	1,4	3,3 - 3,7	3000 - 3150	63 - 67

Neto e Pardini (2006) enumeraram as principais vantagens das fibras vegetais em sendo:

- baixa massa específica.
- maciez e abrasividade reduzida.
- baixo custo.
- reciclabilidade, atoxicidade e biodegradabilidade.
- estímulo a empregos na zona rural.
- baixo consumo de energia em sua produção.

Como desvantagens, é possível citar:

- acentuada variabilidade em suas propriedades mecânicas.
- sensibilidade a efeitos ambientais (variações de temperatura e umidade).
- presença de seções transversais de geometria complexa e não uniforme.
- propriedades mecânicas modestas quando comparadas às fibras sintéticas (fibra de carbono, de vidro, etc.).

2.4. Mecanismo de Interação Solo-Fibra – Estudos Experimentais

Este tópico visa demostrar os mecanismos que regem o comportamento do material compósito, de forma que se possa entender as causas pelas quais a introdução de fibras pode incrementar a resistência ao cisalhamento de solos.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112042/CA

Durante anos, diversos pesquisadores ao redor do mundo concentraram seus esforços para melhor compreender o funcionamento da estrutura solo-fibra. Há que se ter em mente a complexidade deste comportamento, o fato de que muitas são as variáveis que influenciam na resistência desses compósitos. Há que se saber os esforços que o solo sofrerá, a aplicação a que se destina determinado compósito, uma vez que uma determinada mistura pode ser adequada para um certa situação e não ser adequada para outra. A combinação das variáveis que regem o comportamento do compósito associada ao conhecimento do projetista é vital para o sucesso de uma obra geotécnica baseada neste tipo de solução, razão a qual se torna indispensável o conhecimento sobre o comportamento dos compósitos, o que justifica a importância deste tópico.

McGown et al. (1978) estudaram o efeito da inclusão de diferentes elementos de reforço em um solo arenoso nos estados denso e fofo. Os autores observaram que o comportamento tensão x deformação do solo reforçado depende fundamentalmente das características de resistência e deformabilidade dos elementos de reforço.

Eles propuseram a divisão de reforço se solos baseada na deformabilidade do reforço em inclusões extensíveis e não-extensíveis. O elemento de reforço extensível tem deformação de ruptura maior que a máxima deformação de tração no solo sem reforço.

Gray e Ohashi (1983) propuseram um modelo teórico para prever o comportamento de uma areia reforçada com fibras. Os autores executaram ensaios de cisalhamento direto com areia, nos estados fofo e denso, reforçada com fibras naturais, sintéticas e metálicas. A partir dos resultados obtidos nos ensaios, eles chegaram à conclusão que a inclusão da fibra aumenta a resistência ao cisalhamento de pico e reduz a queda pós-pico. Também foi possível observar a existência de uma tensão de confinamento crítica onde, abaixo desta, as fibras são arrancadas e, acima desta, as fibras são alongadas.

A orientação das fibras com relação à superfície de cisalhamento também é considerada no modelo. Na Figura 2.8 são apresentados resultados de ensaios de cisalhamento direto realizados pelos autores mencionados anteriormente. Como se pode observar, a inclinação de 60° em relação ao plano de ruptura representa a maior contribuição em termos de resistência e a inclinação de 120° representa a redução da resistência ao cisalhamento.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112042/CA

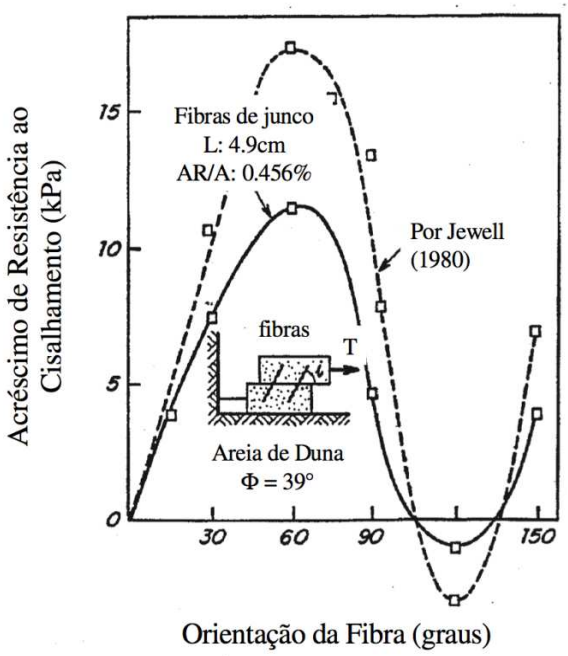

Figura 2.8 – Acréscimo de resistência em função da inclinação da fibra (Gray e Ohashi, 1983)

Uma análise sobre os efeitos da inclusão de fibras na resistência à compressão simples de um solo residual compactado com diferentes valores de umidade foi elaborada por Freitag (1986). Ele utilizou fibras de polipropileno com diâmetros de 0,10mm e 0,20mm. As fibras de polipropileno tinham comprimento de 2cm e foram adicionadas no teor de 1% em volume. Como resultado, o autor observou um aumento na resistência à compressão simples (sem confinamento), em especial, para misturas compactadas com umidades próximas ao valor ótimo e no ramo úmido da curva de compactação. As curvas tensão x deformação mostraram que o solo reforçado com as fibras rompiam com uma deformação bastante superior à deformação do solo não reforçado sendo, portanto, capaz de absorver maior energia de deformação.

Gray & Maher (1989) analisaram a influência de uma série de parâmetros das fibras e do solo sobre o comportamento tensão-deformação, no qual as fibras foram distribuídas de forma aleatória no solo, portanto, evitando a existência de planos de fraqueza no compósito, sendo este totalmente isotrópico. Perceberam a existência de uma tensão de confinamento crítica, onde o aumento da relação largura/diâmetro resulta na redução desta tensão e torna mais efetiva a

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112042/CA

contribuição da fibra no aumento da resistência ao cisalhamento. Perceberam também que o crescimento da resistência ao cisalhamento com o aumento do teor de fibra ocorre até um determinado ponto a partir do qual esta começa a decrescer.

Shewbridge e Sitar (1989) usaram um equipamento de cisalhamento direto de grande dimensão para avaliar o mecanismo que desenvolve uma zona de ruptura em um solo arenoso. Para o solo reforçado, a zona de ruptura era mais larga e aumentava com a concentração, rigidez e aderência entre o solo e o reforço. Eles concluíram que o aumento da resistência é função das propriedades da areia (graduação, tamanho e forma das partículas) e da fibra (teor, relação largura/diâmetro e módulo). Observaram que a resistência diminui com o aumento do tamanho médio e da esfericidade das partículas de areia, por outro lado, há um acréscimo da resistência com o aumento do coeficiente de uniformidade da areia, do teor de fibras, do módulo das fibras e da relação largura/diâmetro.

Maher e Ho (1993) estudaram o comportamento de uma argila acrescida de diferentes teores de cimento, pretendendo simular um material com diferentes valores de coesão. Concluíram que o aumento da coesão reduz a contribuição das fibras para o aumento de resistência de pico do solo.

Maher e Ho (1994) estudaram as propriedades mecânicas e hidráulicas de um compósito feito de caulinita e fibra, utilizando ensaios de compressão simples, compressão diametral, flexão e condutividade hidráulica. Os autores utilizaram fibras de polipropileno, vidro e celulose. Eles observaram que a inclusão de fibras aleatoriamente orientadas aumentou consideravelmente a resistência e a ductilidade deste compósito, em especial, para as misturas com baixos teores de umidade. Perceberam que para um determinado teor de fibras, entre mais curtas elas sejam, maior será a quantidade de fibras contidas na matriz, e que existe uma chance maior de haver mais fibras na zona de cisalhamento, o que contribuiria para o aumento da resistência. Após a ruptura, entretanto, as fibras mais curtas são mais suscetíveis ao arrancamento, o que ressalva a necessidade de se utilizar fibras mais longas quando houver a necessidade de se melhorar a ductilidade e a capacidade de absorção de energia. Um fato importante observado foi que a introdução de fibras contribuiu para o aumento da permeabilidade do solo estudado, sobretudo, para maiores teores de fibra.

Fibras de polipropileno aleatoriamente orientadas foram utilizadas para reforçar dois solos, um argiloso e outro arenoso, em ensaios de laboratório

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112042/CA

executados por Nataraj et al. (1996). O resultados obtidos mostraram que não existiu uma significativa variação nos parâmetros de compactação do solo. Observou-se um aumento na resistência ao cisalhamento para o solo arenoso, em especial, para os maiores teores de fibra estudados. A inclusão das fibras propiciou um aumento à compressão simples para os dois tipos de solo.

Um solo argiloso e outro arenoso, ambos reforçados com fibras de polipropileno foram estudados por Teodoro e Bueno (1998) e Teodoro (1999). Os autores estudaram o comportamento de misturas com diferentes teores, variando entre 0,1% a 1%, e comprimentos de fibras entre 10mm a 30mm, fazendo uso de ensaios triaxiais, compressão simples e cisalhamento direto. Também elaboraram painéis com solo de matriz argilosa, a fim de se estudar o padrão de fissuramento deste material ao ser submetido a variações térmicas. Concluíram que a introdução das fibras contribui para um aumento na resistência ao cisalhamento e diminui a queda da resistência pós-pico do solo. Em especial, para o solo arenoso, verificaram que as envoltórias tendem a uma bilinearilidade, à medida que o teor e o comprimento das fibras aumentam. Eles observaram também que a introdução das fibras nos painéis executados com o solo argiloso, reduziu o tamanho das trincas, que não deixaram de se formar.

Os efeitos da introdução de fibras sintéticas com propriedades mecânicas distintas, aleatoriamente distribuídas, no comportamento de um solo arenoso, cimentado e não cimentado, foram estudados por Montardo (1999), Montardo et al. (2002) e Consoli et al (2002). Os autores concluíram que:

- fibras relativamente rígidas (fibras de vidro e PET) exercem efeito mais pronunciado na resistência de ruptura, ao passo que fibras relativamente flexíveis (fibras de polipropileno) exercem efeito mais pronunciado no modo de ruptura e no comportamento último.

- a inclusão de fibras PET ou de vidro aumentou tanto a resistência à compressão, quanto a resistência à tração da matriz cimentada, enquanto que as fibras de polipropileno não aumentou estas duas variáveis.

- a inclusão de fibras de polipropileno no compósito cimentado alterou o comportamento do material na ruptura, que era frágil e passou a ser dúctil,

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112042/CA

sendo que o uso das fibras PET e de vidro não modificou o modo de ruptura.

- a rigidez inicial não foi afetada pela inclusão das fibras PET e de vidro, porém ela é drasticamente reduzida com a inclusão de fibras de polipropileno.

Specht (2000) estudou o comportamento mecânico, os parâmetros de resistência e os de deformabilidade, de um solo residual artificialmente cimentado, reforçado com dois diferentes tipos de fibras poliméricas (um em forma de filamentos e outra fibrilada), que apresentavam variação em suas propriedades mecânicas. Foram realizados ensaios sob condições de carga estática e dinâmica, através dos quais o autor concluiu que as fibras extensíveis (em forma de filamentos) foram mais efetivas na melhoria das características pós-ruptura do compósito aumentando de forma expressiva a tenacidade, a ductilidade e a resistência à fadiga. Ele também percebeu que as fibras de caráter inextensíveis (fibriladas) foram mais efetivas na redução da deformabilidade e no aumento da resistência de pico. Foram dimensionadas estruturas de pavimento semi-rígido, onde se observou uma significativa redução na espessura da camada cimentada quando da utilização de reforços fibrosos em forma de filamentos.

Feuerharmel (2000) estudou o comportamento de três tipos de solo (uma argila, uma areia-siltosa e uma areia), artificialmente cimentadas (teor de 7% em relação ao peso de material seco) e não-cimentadas, reforçadas com fibras de polipropileno (teor de 0.5%) de dois comprimentos (12 e 36mm); a distribuição das fibras na massa de solo foi aleatória. O autor concluiu que: (1) a adição de fibras de polipropileno provocou reduções no módulo de deformação inicial do solo, sendo que a intensidade das alterações depende do tipo e das características de cada solo. Para misturas não-cimentadas, os solos menos rígidos foram os mais afetados enquanto que as alterações na areia foram pequenas; (2) quanto à resistência ao cisalhamento, o comportamento resistente dos solos não-cimentados reforçados pode ser dividido em três etapas, uma inicial, onde o comportamento é controlado basicamente pela matriz de solo, uma etapa intermediária, na qual o comportamento do material compósito é comandado juntamente pela matriz e

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112042/CA

pelos elementos de reforço, e uma etapa final, onde o comportamento do material é comandado exclusivamente pelas fibras; (3) para os solos não-cimentados, cujas deformações se distribuem por toda a amostra, as fibras constituem uma estrutura entrelaçada que impõe uma resistência às deformações radiais na amostra, aumentando assim as deformações de compressão do solo. Este efeito depende da adesão entre o solo e as fibras, sendo que para a areia, onde esta adesão é inferior aos demais solos, não se observa alterações significativas na variação volumétrica; (4) para os solos cimentados, onde as deformações se concentram apenas na superfície de ruptura, as fibras atuam, em hipótese, de duas maneiras, (a) o efeito de ancoragem, proporcionado pelas fibras ancoradas nos dois lados da superfície de cisalhamento e que tende a reduzir a dilatância; (b) a redistribuição de esforços, que causa a expansão da superfície de cisalhamento, tendendo a aumentar as deformações volumétricas de expansão.

Casagrande (2001) e Casagrande e Consoli (2002) elaboraram um estudo utilizando uma areia siltosa reforçada com fibras de polipropileno, no qual demostraram um constante crescimento da resistência ao cisalhamento, conforme o aumento da deformação axial, caracterizando um comportamento elasto-plástico de enrijecimento. Eles concluíram que as fibras contribuíam de forma mais significativa para o ganho de resistência do compósito a partir de 2,5% de deformação axial.

Utilizando ensaios triaxias, bem como ensaios de placa, Vendruscolo (2003) conclui que os parâmetros de resistência e deformação de um solo arenoso (cimentado e não cimentado) reforçado com fibras, varia em função das propriedades da matriz, na qual o efeito da adição das fibras é mais enfático para maiores comprimentos e maiores teores de fibras. Segundo o autor, a influência das fibras na resistência de pico e última do material depende do diâmetro das fibras e da distribuição granulométrica do solo.

Consoli et al. (2004) estudou o comportamento de uma areia (cimentada e não cimentada), reforçada com fibras. Percebeu que para misturas com fibras de polipropileno, com comprimento de 36mm (o maior dos comprimentos estudados) houve uma consideravelmente redução do índice de fragilidade da areia cimentada, que passaram a apresentar uma ruptura frágil ao invés de dúctil. Tal efeito não foi observado nas misturas com outros tipos de fibra estudados. Isso demonstra que não é possível estabelecer regras de comportamento sem o

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112042/CA

conhecimento prévio das propriedades dos materiais envolvidos.

Santos (2004) desenvolveu um equipamento de compressão confinada com medição de tensão lateral e avaliou o comportamento, sobre a trajetória de tensões Ko, de uma areia e de misturas de areia-fibra, considerando a influência da adição de fibras de diferentes comprimentos. Os resultados mostraram que: (1) a inclusão de fibras torna-se cada vez mais significativa com o aumento das tensões e que a variação do comprimento das fibras também tem efeito sobre a trajetória de tensões, sendo maior a influência quanto maior for o comprimento destas; (2) a tensão lateral diminui com a inclusão de fibras, sendo esta redução cada vez mais significativa com o aumento das tensões verticais e proporcional ao comprimento das fibras; (3) a presença de fibras modifica o comportamento tensão-deformação no carregamento principalmente nas tensões iniciais e praticamente mantém a mesma forma da curva da areia sem fibras nas tensões maiores e no descarregamento e (4) os valores de Ko diminuem com a inclusão de fibras e com o aumento do comprimento das mesmas para todos os níveis de tensão tanto no carregamento quanto no descarregamento, mantendo-se praticamente constantes no carregamento e crescendo no descarregamento.

Casagrande (2005) realizou ensaios triaxiais consolidados drenados com distintas trajetórias de tensões (compressão axial, descarregamento lateral e p' constante) e isotrópicos com aplicação de altas tensões em misturas feitos com areia e fibras de polipropileno, bem como ensaios do tipo ring shear em misturas de areia e bentonita, com e sem reforço, além de e provas de carga em placa de 0.30 m de diâmetro sobre espessas camadas de areia compactada, reforçada e não reforçada com fibras. O autor relatou o aumento dos parâmetros de resistência ao cisalhamento de pico, bem como das resistência pós-pico das matrizes estudadas após grandes deslocamentos horizontais, sem quedas significativas de resistência pós-pico no caso da matriz arenosa. Para a matriz de alta plasticidade e altos índices de vazios, o acréscimo de resistência tende a reduzir com o aumento das deformações cisalhantes. O efeito da inclusão de fibras foi mais evidente para baixas tensões efetivas médias iniciais, menores diâmetros, maiores comprimentos e maiores teores de fibras, sendo seu efeito mais pronunciado para misturas mais densas. O comportamento carga-recalque do solo arenoso foi significativamente influenciado pela adição de fibras, aumentando a capacidade de suporte deste e alterando mecanismos de ruptura.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112042/CA

Falorca (2006) conclui através de ensaios de cisalhamento e do tipo ring shear, que o acréscimo do deslocamento devido ao cisalhamento de um solo reforçado, acarreta num aumento da resistência ao cisalhamento deste, além de identificar uma relação entre o aumento da resistência ao cisalhamento dos solos e da dilatância, quer dizer, quando a dilatância diminui, a resistência ao cisalhamento deixa de aumentar.

Donato (2007) avaliou a distribuição de tensões em um solo arenoso reforçado com fibras de polipropileno através de ensaios de prova de carga em placa circular de 0.30 m de diâmetro, com medidas diretas de tensão pelo uso de células de tensão total. Além disso, utilizou-se o método dos elementos finitos (MEF) para simular numericamente a distribuição de tensões dentro de câmaras de calibração. O autor concluiu que: (1) o comportamento carga-recalque da areia e das areias reforçadas é similar no início do carregamento, até o momento em que a mobilização das fibras inseridas na matriz se mostra mais efetiva, a partir de certo nível de recalque e carga aplicada. (2) a distribuição das tensões verticais é função do fator de forma das câmaras, onde a câmara com maior fator apresenta uma maior redução das tensões com o aumento da profundidade analisada.

Curcio (2008) estudou o comportamento hidromecânico e mecânico de amostras de solo compactado reforçado com fibras de PET reciclado. A adição de fibras reduziu a magnitude das fissuras de tração. Observou-se que o comportamento do material compósito com relação à resistência à tração parece ser inicialmente controlado unicamente pela matriz de solo. À medida que crescem as deformações, o comportamento passa a ser controlado pela matriz e pelas fibras. A adição de 1% de fibras, além de favorecer o acréscimo da tensão de tração máxima do solo, retarda a abertura de fissuras e reduz a magnitude das mesmas, sem alterar as propriedades desejáveis na compactação e sem influenciar negativamente a condutividade hidráulica do solo quando utilizadas sob tensão confinante.

Consoli e Casagrande (2009) estudaram o efeito da densidade relativa da areia reforçada com fibras de polipropileno submetidas a ensaios de placa, concluindo que o efeito de inclusão das fibras pode ser mais pronunciado para densidades mais altas.

Girardello (2010) avaliou o comportamento mecânico de uma areia não saturada, com e sem reforço de fibras de polipropileno, através de ensaios de placa

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112042/CA

em densidade relativa de 50% e 90%, ensaios triaxiais e ensaios de sucção. O melhor resultado foi obtido para o ensaio de placa realizado na maior densidade relativa. Quanto aos ensaios de sucção, nota-se que a inclusão das fibras não ofereceu nenhuma influência na magnitude da resistência apresentada devido à sucção. Quanto aos ensaios de placa, a inclusão aleatória das fibras confere ao material uma melhora no comportamento carga-recalque, com influência na mudança dos mecanismos de ruptura. O comportamento carga-recalque não difere para o solo reforçado e sem reforço. Essa diferença é perceptível a partir do momento em que a mobilização das fibras que são inseridas na matriz arenosa começa a se mostrar mais efetivas, que ocorre somente após certo nível de recalque e carga aplicada.

Lirer (2012) estudou o comportamento de uma areia com pedregulho misturada com fibras de polipropileno chegando a concluir que a adição das fibras ao material oferece uma maior influencia ao material para baixas tensões confinantes. Para grandes deformações o comportamento resistente do material com reforço e sem reforço é similar, isto quer dizer que a adição das fibras à areia com pedregulhos não contribui positivamente à resistência do material quando ele sofre grandes deformações.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112042/CA

2.5. Mecanismo de Interação Solo-Fibra – Estudos Experimentais

Este tópico tem o objetivo de descrever as conclusões de alguns autores relacionadas a certas mudanças que ocorrem com respeito ao comportamento mecânico e algumas propriedades dos solos reforçados com fibras, tais como a compactação, a resistência, a deformabilidade, o modo de ruptura, a variação volumétrica, a rigidez inicial e a condutividade hidráulica.

2.5.1. Compactação

Ao estudar a influência da adição de fibras de polipropileno na compactação de um cascalho com areia, Hoare (1979) percebeu que as fibras conferem uma certa resistência à compactação, resultando em porosidades maiores da mistura, para as mesmas energias de compactação, sendo este aumento linear em relação à quantidade de fibra e independente do tipo de compactação empregada.

Resultados de ensaios empregando-se dois tipos de reforços diferentes sugeriram ainda que a influência na compactação é comandada pela interação entre solo e reforço, atentando para aspectos como a granulometria do solo, forma das partículas, textura e área superficial do reforço.

Al Wahab e Al-Qurna (1995) avaliaram os efeitos da inclusão de vários teores de fibra (0%; 0,5%; 1% e 2% em peso do solo seco) na curva de compactação de uma argila. Os resultados encontrados demonstraram um decréscimo da densidade e um acréscimo na umidade ótima para a adição de 2% de fibra, considerados não muito significativos.

Bueno et al. (1996) observaram o mesmo comportamento com relação à umidade para um solo arenoso, ao contrário do solo argiloso, onde não foi observada nenhuma alteração na umidade ótima. Em ambos os casos, a densidade máxima não sofreu alterações com a inclusão de fibras.

Vários outros autores relataram também não ter encontrado nenhuma alteração significativa com a inclusão de fibras (e.g. Maher e Ho, 1994; Ulbrich, 1997; Consoli et al, 1999; Casagrande, 2001; Heineck, 2002).

Ao compactar um solo laterítico quando reforçado com fibras de sisal tratadas superficialmente com EPS, Leocádio (2005) observou um aumento significativo em sua densidade seca máxima. Também pode perceber um aumento no teor de umidade ótimo, quando se aumentou o teor das fibras, com redução deste aumento da umidade ótima com o tratamento superficial. O autor justifica que o tratamento com EPS reduz a absorção de umidade das fibras de sisal.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112042/CA

2.5.2. Resistência ao Cisalhamento de Pico

Através de ensaios de compressão simples e de compressão diametral, Maher e Ho (1994) concluíram que a inclusão de fibras tem uma influência significativa nas propriedades mecânicas de argilas cauliníticas. Ele observaram um aumento do pico de resistência à compressão e à tração, assim como o aumento da ductilidade do material. Eles também perceberam que o aumento no teor de fibras aumentou a resistência à tração e à compressão, entretanto, o aumento no comprimento das fibras analisada pelos autores, diminuiu o ganho de resistência, tanto à compressão quanto à tração. A umidade do solo no momento

da compactação também afeta essas relações, sendo elas mais expressivas para menores umidades, tal como observado por Andersland e Kattak (1979) e por Nataraj et al. (1996).

Bueno et al. (1996) elaborou um estudo comparativo entre um material granular e um coesivo, observando que os solos coesivos são menos sensíveis ao aumento do comprimento das fibras. Após estudos envolvendo ensaios triaxiais, concluiu a ocorrência de um acréscimo no ângulo de atrito com a adição do reforço, sendo este maior quanto maior for a quantidade de fibras.

Ranjan e Charan (1996) observaram que a curva tensão x deformação de uma areia fina reforçada exibia tendências a crescimento mesmo a deformações axiais de ordem de 20%. Teodoro (1999) observou um aumento na resistência de uma areia siltosa reforçada com o aumento no comprimento das fibras de polipropileno de 0 para 30mm, comportamento este distinto do solo argiloso, que apresentou um máximo de resistência para fibras de 15mm.

Maher e Gray (1990) utilizaram bolas de vidro com granulometria uniforme ao invés do solo. Dois diferentes diâmetros de bolas de vidro foram testados, com 0,25mm e 0,31mm. Os autores perceberam que a configuração com maior diâmetro implicava numa menor contribuição das fibras para a resistência da mistura.

Muitos autores relatam haver identificado acréscimos na resistência pela inclusão de fibras ao solo. Alguns constataram um aumento da resistência de forma linear com o aumento da quantidade de reforço (Gray e Ohashi, 1983; Gray e Al-Refeai, 1986), enquanto outros constataram um aumento não linear (Shewbridge e Sitar, 1989; Jewell e Wroth, 1987; Teodoro, 1999).

Muitos pesquisadores tais como (Hoare, 1979; Gray e& Ohashi, 1983; Bueno et al., 1996; Nataraj et al., 1996; Stauffer e Holtz, 1996). Identificaram a existência de um aumento no ângulo de atrito, bem como no intercepto coesivo com a inclusão de fibras e com o aumento do teor de fibras.

Teodoro (1999) e Casagrande (2001) observaram o aumento da parcela coesiva de uma areia siltosa reforçada, porém, sem verificar quaisquer alterações relevantes no ângulo de atrito.

Heineck (2002) identificou uma bi-linearidade na envoltória de ruptura de uma areia siltosa reforçada com fibras. A parte inicial da envoltória possui um intercepto coesivo praticamente inexistente e um ângulo de atrito que supera o

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112042/CA

dobro do valor correspondente ao solo sem reforço. Já na segunda parte da envoltória, acima da tensão confinante crítica, o ângulo de atrito é semelhante ao do solo sem reforço, entretanto, houve um acréscimo razoável do intercepto coesivo. A bi-linearidade foi também observada por vários autores (Gray e Ohashi, 1983; Gray e Al Refeai, 1986; Maher e Gray, 1990; Stauffer e Holtz, 1996; Morel e Gourc, 1997; Kaniraj e Havanagi, 2001). Foi observado ainda que quanto menor for a rugosidade ou aderência da interface solo-fibra, maior é a tensão de confinamento crítica. Fibras mais rugosas tendem a ser mais efetivas no aumento da resistência.

Montardo (1999) e Consoli et al. (2002) perceberam o aumento no ângulo de atrito de uma areia uniforme cimentada e não cimentada reforçada com vários tipos de fibra. Eles também identificaram aumentos na coesão, porém, apenas para a areia não cimentada reforçada com fibras. Resultados semelhantes também foram obtidos por Heineck (2002) para uma areia reforçada com fibras. Não foi constatada pelos autores a existência de uma tensão de confinamento crítica para estes materiais.

Consoli et al. (1999) observaram que quanto maior é a quantidade de cimento adicionada ao solo, menos pronunciado é o acréscimo de resistência causado pela adição das fibras.

Para Specht et al. (2002), a alteração dos parâmetros de resistência depende das características do reforço. Os autores observaram que para uma areia siltosa cimentada reforçada com fibras extensíveis não houve alteração dos parâmetros de resistência, por outro lado, considerando fibras inextensíveis, houve um leve aumento da coesão e do ângulo de atrito da areia siltosa cimentada reforçada com as fibras mais rígidas.

Omine et al. (1996) concluíram que a inclusão de fibras pode aumentar ou reduzir a resistência de pico conforme o teor de cimento adicionado a mistura, ou seja, entre mais ou menos rígido por o compósito, sendo este efeito mais pronunciado com o aumento no teor de fibra inserido. Eles também puderam verificar que a resistência aumenta conforme o aumento da esbeltes da fibra, fato este também relatado por Consoli et al. (1999)

Lima et al. (1996) identificaram um aumento da relação entre a resistência à tração e a resistência à compressão com a adição de fibras para um solo silto-argiloso estabilizado com cal. Eles perceberam, através de estudos realizados com

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112042/CA

ensaios triaxiais, o aumento no angulo de atrito das misturas, sem que houvesse contudo uma relação direta entre este aumento e o acréscimo no teor de fibra inserido. Também perceberam que houve um aumento na coesão, com a adição da fibra, para uma matriz com teor de 4% de cal. Por outro lado, para uma matriz com 8% de teor de cal, houve um decréscimo na resistência ao se acrescer o teor de fibra.

Alguns autores (e. g. Bueno et al., 1996; Nataraj et al., 1996; Teodoro, 1999; Heineck, 2002) concordam que há um incremento na coesão devido a inclusão de fibras no solo.

Andersland e Kattak (1979) observaram a existência de uma grande taxa de acréscimo de resistência com a deformação, mesmo para níveis elevados de deformação axial (20%). Comportamento semelhante também foi observado por Feuerharmel (2000).

Andersland e Kattak (1979), Al Wahab e El-Kedrah (1995), Teodoro (1999) e Heineck (2002) perceberam, através de análises realizadas com ensaios triaxiais, a existência de um acréscimo no ângulo de atrito com a adição do reforço, sendo este maior quanto maior for a quantidade de fibras.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112042/CA

2.5.3.
Resistência ao Cisalhamento Pós-Pico

Praticamente todos os trabalhos que analisaram o comportamento de solos reforçados em termos da resistência concluíram que a adição de fibras reduz a queda da resistência pós-pico (Gray e Ohashi, 1983; Gray e Al-Refeai, 1986; Fatani et al., 1991; Ranjan et al., 1996; Consoli et al.; 1997-b, 1999, 2002-b; Donato et al., 2004, 2007; Casagrande, 2005 e Festugato, 2008).

2.5.4.
Deformabilidade

Foi observado por McGown et al. (1988), através de um ensaio de placa de pequenas dimensões, uma grande parcela de deformação recuperada com o descarregamento, referente a 20% da deformação total imposta.

McGown et al. (1988), para areias e Maher e Ho (1994) e Nataraj et al. (1996), para argilas, relataram um aumento no módulo de deformação, tanto

maior quanto maior o teor de fibras. Contrariamente, Ulbrich (1997) e Consoli et al. (1999) obtiveram redução do módulo com a inclusão de fibras, para areias cimentadas e não cimentadas.

Stauffer e Holtz (1996) relataram que a adição de fibras aumenta as deformações volumétricas de compressão na ruptura, sendo este aumento mais pronunciado para uma areia mal graduada que para uma bem graduada (ambas com mesmo diâmetro D50 dos grãos).

Para Heineck (2002) e Heineck et al. (2003-a), a taxa de deformação onde as fibras passam a contribuir de forma mais significativa para o acréscimo de resistência ao cisalhamento depende do tipo de matriz.

Consoli, Casagrande e Coop (2007), estudaram o desempenho de uma areia reforçada com fibras de polipropileno de diferentes comprimentos, submetida a grandes deformações cisalhantes mediante a execução de ensaios de ring shear. Os autores perceberam que quanto maior for o comprimento das fibras de reforço, maior será o incremento da resistência cisalhante do solo. Foi observado também que quanto maior for a deformação cisalhante nos ensaios, maior será a quantidade de fibras rompidas, isto confere a ideia de que as fibras se alongam até que as deformações do ensaio superem a deformação de ruptura das fibras, porém, as fibras sofrem deformações plásticas antes de romper.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112042/CA

2.5.5. Modo de Ruptura

O aumento da ductilidade do solo com a adição de fibras é uma observação feita em caráter unânime pelos vários autores que avaliaram este parâmetro (HOARE, 1979; McGown et al., 1988; Maher & Ho, 1993; Nataraj et al., 1996; Consoli et al., 1999), sendo este aumento mais pronunciado quanto maior a quantidade de fibras.

Montardo (1999) concluiu que a inclusão de fibras de polipropileno no compósito de matriz cimentada altera significativamente o seu modo de ruptura. Com a inclusão das fibras o comportamento do material na ruptura, que era frágil, torna-se dúctil. Estas constatações resultaram da análise dos índices de fragilidade e da verificação visual da ausência ou presença de planos de ruptura nos corpos de prova rompidos. Concluiu ainda que a inclusão de fibras PET reduziu

sensivelmente o índice de fragilidade da matriz cimentada, mas não foi suficiente para expressar uma modificação no modo de ruptura da matriz cimentada, e que a inclusão de fibras de vidro não modificou o modo de ruptura do material.

Specht (2000) avaliou os efeitos da inclusão de fibras poliméricas de diferentes propriedades mecânicas (uma em forma de filamentos e outra fibrilada – tipo mesh) num solo artificialmente cimentado e observou que com a inclusão de fibras mais alongáveis (em forma de filamento) o comportamento do material, que era frágil, torna-se dúctil. Sendo que para as fibras mais rígidas (tipo mesh) não se expressa uma modificação no modo de ruptura do material.

Segundo Feuerharmel (2000), a forma de ruptura do solo é grandemente alterada pela inclusão de fibras de polipropileno, reduzindo a fragilidade dos solos. A amplitude dessas alterações depende fundamentalmente de uma boa adesão solo-fibra, que pode ser atingida pela ação de um agente cimentante, formando uma estrutura cimentada bastante resistente ou por uma combinação apropriada dos fatores comprimento das fibras e tensões efetivas médias normais atuantes.

Uma mudança significativa quanto ao modo de ruptura foi verificado por Donato et al. (2004), onde todas as amostras cimentadas não reforçadas estudadas exibiram um comportamento frágil na ruptura, enquanto que as amostras reforçadas com 0,5% de fibras de polipropileno apresentaram uma fragilidade menos pronunciada, mudando o comportamento de frágil para dúctil.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112042/CA

2.5.6. Variação Volumétrica

A adição de fibras aumenta as deformações volumétricas de compressão na ruptura, segundo relatos de Stauffer e Holtz (1996), sendo este aumento mais pronunciado para uma areia uniforme do que para uma areia bem graduada, ambas com mesmo diâmetro médio (D50).

O aumento da compressibilidade do solo com a inclusão de fibras também foi observado por Bueno et al. (1996). Segundo Shewbridge e Sitar (1989), a deformação volumétrica aumenta com o acréscimo da quantidade de reforço, porém, de forma não linear, similar ao observado por Nataraj et al. (1996).

2.5.7.
Rigidez Inicial

Montardo (1999) observou uma queda bastante acentuada da rigidez inicial de uma areia cimentada reforçada com fibras de polipropileno. No entanto, as fibras de polietileno tereftalato e de vidro não causaram alteração alguma no módulo.

Portanto, o efeito do reforço fibroso na rigidez inicial do compósito depende das características do mesmo. Michalowski e Cermák (2003) observaram que a adição de uma fibra sintética em um solo arenoso causou uma queda da rigidez inicial, por outro lado, a adição de fibras de aço aumentou a rigidez inicial. Para Feuerharmel (2000) a intensidade das alterações no módulo de elasticidade depende também do tipo e das características de cada solo. Estudos realizados pelo autor em argila e areia siltosa reforçada com fibras de polipropileno indicaram grande redução do módulo, enquanto que, os resultados de ensaios realizados em areia reforçada mostraram pequenas alterações no módulo. Entretanto, considerando misturas cimentadas reforçadas com fibras, as reduções do módulo foram bastante acentuadas para os três solos analisados.

Os resultados de ensaios dinâmicos utilizando *bender elements* realizados por Heineck (2002) não indicaram alteração do G_0 do solo arenoso quando da inclusão das fibras.

2.5.8.
Condutividade hidráulica e outras propriedades

O aumento da condutividade hidráulica devido à adição de fibras em solos argilosos é relatado por vários autores. Maher e Ho (1994) observam um aumento na condutividade hidráulica para teores de fibra > 1% (polipropileno e vidro). Já Al Wahab e El-Kedrah (1995) observam um aumento da condutividade hidráulica em mais de uma ordem de grandeza para 2% de fibra (polipropileno).

Al Wahab e El-Kedrah (1995) observaram também a redução do potencial de retração e inchamento em torno de 30 a 35% com a adição de fibras, sendo este efeito mais pronunciado no ramo seco da curva de compactação e menos pronunciado no ramo úmido.

Bueno et al. (1996) relataram uma redução da permeabilidade de uma ordem

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112042/CA

de grandeza, causada pela adição de fibras a solos granulares.

Feurharmel (2000) observa que são obtidos valores de condutividade hidráulica bem mais elevados no momento em que são adicionados fibras e cimento ao material argiloso, pois com a floculação das partículas de argila, estas, que antes aderiam às fibras, passam a se aglomerar ao redor de partículas de cimento, propiciando a segregação das fibras.

Segundo Heineck (2002) e Heineck et al. (2003-b), para todas as matrizes estudadas, a adição de 0,5% de fibras de polipropileno de 24 mm não causou mudanças significativas na condutividade hidráulica avaliada.

Curcio (2008) concluiu que a adição de 1% de fibras, além de favorecer o acréscimo da tensão de tração máxima do solo, retarda a abertura de fissuras e reduz a magnitude das mesmas, sem alterar as propriedades desejáveis na compactação e sem influenciar negativamente a condutividade hidráulica de solo quando utilizadas sob tensão confinante.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112042/CA

2.6. Fibra de Coco

2.6.1. Histórico

O coqueiro (Cocos nucifera L) é uma das frutíferas mais difundidas naturalmente no globo terrestre, ocorrendo em praticamente todos os continentes. Em virtude desta dispersão e adaptabilidade, seu cultivo e sua utilização se dão de forma expressiva em todo o mundo, com os mais variados produtos, tanto de forma in natura quanto industrializada.

O coqueiro não é uma espécie nativa do Brasil, não estava aqui no momento da chegada dos portugueses, em 1500. As primeiras referências da presença dessa espécie em território nacional aparecem no “Tratado Descriptivo do Brasil”, escrito por Gabriel Soares de Souza em 1587, em um trecho com os seguintes dizeres: “As palmeiras que dão os cocos se dão bem na Bahia, melhor que na Índia, porque metendo um coco debaixo da terra, a palmeira que dele nasce dá coco em cinco e seis anos, e na Índia não dão, estas plantas, frutos em vinte anos” (Bondar, 1955).

O coqueiro foi introduzido no Brasil no ano de 1553, no Estado da Bahia,

procedendo das ilhas de Cabo Verde. A origem remota desse material seria a Índia ou Sri Lanka de onde cocos teriam sido introduzidos em Moçambique. Esta hipótese se dá pela semelhança entre o coqueiro do Oeste da África e o coqueiro Gigante de Moçambique (Nucé de Lamothe, 1983).

O consenso geral dos estudiosos no assunto é de que o coqueiro é originado do sudoeste do Pacífico (Purseglove 1972; Child 1974; apud Schuiling e Harries 1994 e Ohler, 1984). No entanto, De Candolle, (1895 apud Ohler 1984), reúne argumentos em favor da origem Asiática, como as correntes marítimas, rota de navegantes e número de nomes comuns encontrados na Ásia.

O coqueiro encontra-se disseminado nos países tropicais, ao longo da faixa costeira entre os trópicos de Câncer e Capricórnio, concentrando-se entre as latitudes 20oN e 20oS. Purseglove (1972, apud Schuiling e Harries, 1994), especulou que o coqueiro foi introduzido em Madagascar por navios corsários Malasianos nos primeiros séculos A.D. e de lá atingiu a costa leste da África. Já Sauer (1967, apud Schuiling e Harries (1994) acredita que a presença mais cedo do coqueiro nas ilhas desabitadas, a exemplo de Seychelles e Mauricío, sugere fortemente a dispersão natural via flutuação na água. O fruto pode flutuar durante dias na água do mar, sem afundar e sem danificar o embrião. A dispersão natural dos frutos nas correntes marítimas pode ter levado os cocos para praias distantes.

Harries (1981, apud Schuiling e Harries 1994) observou que a variedade de coqueiro comum do leste da África é de germinação tardia com características semelhantes ao tipo selvagem do coqueiro do subcontinente Indiano, enquanto a variedade comum da península da Malásia germina mais cedo, semelhante ao tipo domesticado. Dessa forma, as teorias de disseminação natural defendida por Sauer e a introdução realizada com a ajuda do homem podem ser consideradas melhores que as teorias de competição. Há muito tempo atrás, navegantes polinesianos, malasianos e árabes desenvolveram um papel importante na distribuição do coco. Mais tarde, os Europeus contribuíram para a disseminação, conduzindo o coco da Ásia e Leste da África para o Oeste da África e costa do Atlântico da América e do Caribe. O acesso ao Atlântico se deu através da Ilha de Santiago ou de Goree, na península de Cabo Verde, quando Vasco da Gama retornou da Índia e Leste da África em 1494 (Ohler 1984).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112042/CA

2.6.2.
Produção e Consumo do Coco Verde

O gênero Cocus é constituído pela espécie Cocus nucifera L. que, por sua vez, é composta por algumas variedades, entre as quais as mais importantes, do ponto de vista agronômico, socioeconômico e agroindustrial, são as variedades Typica (variedade Gigante) e Nana (variedade Anã), que se acredita ter originado de uma mutação gênica da Gigante (Aragão 2002; Santos et al.,1996).

No Brasil, a principal demanda de plantio da variedade Anã é a cultivar Verde, para consumo da água do fruto ainda imaturo. Embora esta variedade apresente também características para ser empregada como matéria-prima nas agroindústrias para produção de leite de coco, coco ralado e outros, seu mercado é essencialmente a água-de-coco (in natura ou processada – Figura 2 e Figura 3), a qual tem maior demanda de consumo para frutos com cerca de sete meses de idade (Aragão, 2002).

O Brasil é o 4° maior produtor mundial. Estima-se que o país possui uma área plantada de 100 mil hectares de coqueiro-anão, destinados à produção do fruto verde para o consumo da água-de-coco.

Cerca de 80% da área plantada com coqueiro situa-se na Ásia (Índia, Filipinas, Indonésia, Sri Lanka e Tailândia) e o restante distribuída entre África, América Latina, Oceania e Caribe (Fontes e Wanderley, 2010). A Indonésia é destacada como o maior produtor mundial de coco, seguido por Filipinas e Índia, entretanto, em área colhida, a Filipinas destaca-se com uma maior área cultivada (Tabela 2.6).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112042/CA

Tabela 2.6 - Produção e área colhida dos principais países produtores de coco, em 2008. (FAO, 2011 apud Martins e Júnior, 2011)

País	Área colhida (ha)	Produção (1.000 t)
Indonésia	2.950.000	19.500.000
Filipinas	3.379.740	15.319.500
Índia	1.940.000	10.894.000
Brasil	287.016	2.759.044
Sri Lanka	394.840	2.210.800
Tailândia	245.725	1.483.927
México	178.500	1.246.400
Vietnã	138.300	1.086.000
Papua Nova Guiné	203.000	677.000
Malásia	174.000	455.408
Outros	1.339.505	5.081.057
Mundo	11.230.626	60.713.136

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112042/CA

2.6.3.
Solo e Clima para a Produção

O coqueiro é uma planta tropical, de baixas altitudes em relação ao nível do mar. Requer, portanto, clima quente e grande intensidade solar, qualquer sombreamento lhe é prejudicial (Assis et al., 2000). Fora da faixa tropical, na orla do oceano com o clima estável marítimo, pode-se encontrar coqueirais, mas a produção em frutos é bem pequena devido à destruição da floração pelas baixas temperaturas nos meses frios. Quanto ao solo, o coqueiro é muito exigente, necessitando de bastante cálcio e fósforo, daí a sua produção nas areias de praia, ricas em cálcio com a presença de restos de conchas marinhas. A condição ideal para o coqueiro é ter o solo leve, permeável, silicoso ou silico-argiloso, com a camada mínima enxuta de 60 cm a 1 m. A água subterrânea, próxima da superfície, lhe é desfavorável. Tolera menos ainda águas estagnadas na superfície. Águas em movimento, ricas em oxigênio, lhe são benéficas e o coqueiro pode ser plantado na beira do mar e na beira dos córregos (Aragão, 2002).

2.6.4.
Características da Espécie

O fruto do coqueiro, o coco, é constituído por uma parte externa lisa (o exocarpo), por uma parte fibrosa e espessa (o mesocarpo); e por uma casca duríssima e lenhosa (endocarpo) (Figura 2.9). Todas essas partes envolvem a amêndoa (Esmeraldo, 2006).

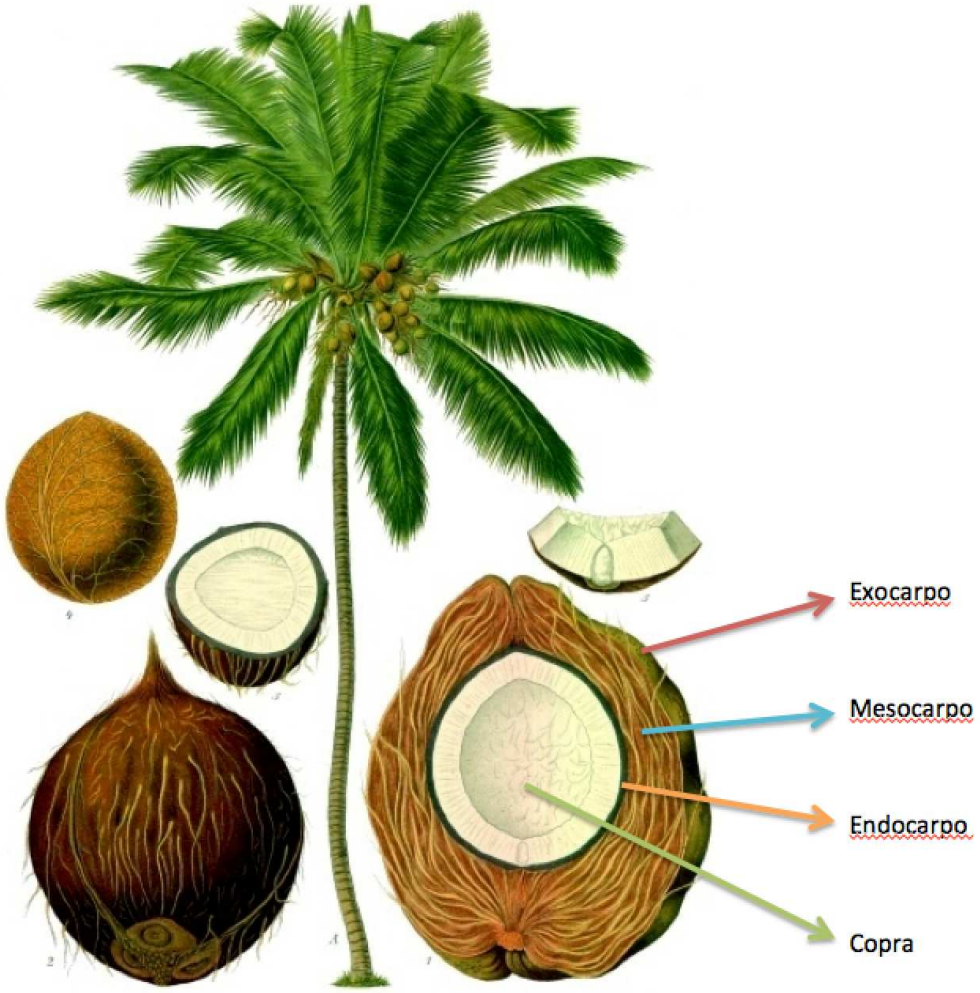

Figura 2.9 - Corte longitudinal do coco

O mesocarpo ou casca fibrosa externa do coco é quase que totalmente destruído no Brasil, no entanto, produz fibras que poderiam ser utilizadas em diversas aplicações industriais. É formado pelas densas fibras, agregadas pelo tecido conjuntivo, fibras resistentes às águas salgadas, próprias para cordoaria naval, tapetes, escovas, etc. A fibra no comércio recebe o nome de coiro ou cairo.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112042/CA

O mesocarpo de cocos maduros e secos fornece fibra lenhosa e dura, que dá coiro ordinário. Os cocos verdes são os que fornecem a melhor fibra celulósica.

A utilização da fibra do mesocarpo é prática antiga. Oriunda da Índia e Sri Lanka, a fibra de coco começou a ser introduzida na Europa após a chegada dos portugueses à Índia. Já nos séculos XIII e XIV os árabes usavam cordas dessa fibra e ensinaram aos navegantes ingleses o seu aproveitamento (Venkataraman e Rangaswany, 1988).

2.6.5. Propriedades das Fibras de Coco

A casca do coco verde, assim como a do coco maduro, é constituída por uma fração de fibras e outra denominada de pó. As fibras de coco são materiais lignocelulósicos obtidos do mesocarpo de cocos e caracterizam-se pela sua dureza e durabilidade atribuída ao alto teor de lignina, quando comparadas com outras fibras naturais (Silva, 2006). Esse material apresenta baixa taxa de degradação, levando mais de 8 anos para completa decomposição (Carrijo et al., 2002).

Corradini et al. **(**2009**)** estudaram a concentração de lignina e celulose, bem como as propriedades mecânicas de cinco cultivares de coqueiro (Cocos nucifera): Nana 'Anão- Verde'-de-Jequi, 'Anão-Amarelo'-de-Gramane, 'Anão-Amarelo'-da-Malásia, 'Anão-vermelho'-da-Malásia e 'Anão-Vermelho'-de-Camarões, em quatro diferentes períodos de maturação, 120, 150, 180 e 210 dias (neste intervalo de tempo o coco ainda se encontra verde). Os autores relataram que o menor teor de lignina encontrado foi de 37,2% (±0,8%), enquanto o maior foi de 43,9% (±0,7%). Com respeito à concentração de celulose, o menor teor identificado foi de 31,5% (±0,1%) e o maior foi de 37,4% (±0,5%). Em termos de celulose, as fibras de coco verde apresentaram valores um pouco inferiores se comparados com os valores encontrados na literatura para a fibra de coco maduro (36-43%) (Mohanty et al., 2000; Bledzki et al., 1996), e em relação ao teor de lignina, os valores obtidos são próximos aos valores observados para o coco maduro (41-45%) (Mohanty et al., 2000). As fibras de coco verde apresentaram menores teores de celulose e maiores teores de lignina em comparação com outras fibras lignocelulósicas, tais como fibra de juta e sisal (Mohanty et al., 2000).

Com respeito às propriedades mecânicas estudadas, o módulo elástico (E)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112042/CA

variou de 801MPa (±308Mpa) a 1.600 Mpa (±508 Mpa), a tensão de ruptura a tração (σr) variou de 82Mpa (±18Mpa) a 129MPa (±40Mpa) e ε variou de 25% (±6%) a 32% (±7%). Os valores de σr e E encontrados por eles são próximos aos valores mencionados por (Mohanty et al., 2000) para coco maduro, os quais são: $4x10^3$ a $6x10^3$ MPa, 131 a 175 MPa, e 15-40%, para E, σr, e ε respectivamente. Esses valores de σr e E obtidos para fibras de coco verde são significativamente menores que os descritos na literatura para outras fibras, como juta e sisal. Isto é atribuído ao menor teor de celulose das fibras de coco (Mohanty. et al., 2002).

Pereira (2012) estudou propriedades da fibra de coco verde. Verificou que a densidade dessa fibra é de cerca de 1,40g/cm^3 e que sua resistência a tração simples é de 6,5 MPa, apresentando uma deformação de 10,4mm. Percebeu também que a absorção de água da fibra era de 4,6% de sua massa após 72 horas submersa e de 17,6%, após 144 horas submersa.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112042/CA

2.6.6. Aplicações com a Fibra de Coco

A seguir serão citadas algumas das aplicações da fibra de coco na atualidade.

2.6.6.1. Uso de Fibras de Coco em Compósitos

Existe uma grande quantidade de pesquisas envolvendo o uso de fibra na elaboração dos mais diversos tipos de compósitos, em especial, se destacam os compósitos poliméricos. Fibras artificiais são frequentemente utilizadas, contudo, a necessidade de se empregar materiais ecologicamente corretos tem direcionado essas pesquisas para as fibras de origem vegetal. Neste cenário, a fibra de coco aparece com um enorme potencial.

Para Passos (2005), o desenvolvimento de novas tecnologias está permitindo que compósitos reforçados com fibra de coco, além de outras fibras vegetais como sisal e juta, estão competindo com os plásticos reforçados com fibra de vidro.

Segundo Pannirselvam *et al.*, (2005), pode-se destacar algumas vantagens no uso de compósitos a base de fibras vegetais quando em comparação com as

fibras de materiais sintéticos:

- Altas propriedades mecânicas específicas;
- Biodegradabilidade e reciclabilidade;
- Baixa densidade e não-abrasividade;
- Baixo consumo de energia e custo de produção;
- Oferta de empregos rurais;
- Resistência a temperaturas altas (até 200°C) sem perda significativa das suas propriedades.

As propriedades das fibras podem ser alteradas pela modificação química, o que permite um crescimento do seu potencial em aplicação tecnológica. A modificação química convencional consiste na reação de esterificação, copolimerização superficial, onde a superfície da fibra lignocelulósica pode ser alterada pelas ligações de ramificação com monômeros vinílicos e a ativação por plasma, onde um gás ionizado modifica as propriedades da fibra de acordo com sua natureza Pannirselvam *et al.*, (2005).

A utilização de fibras vegetais em compósitos de fibrocimento também tem sido estudada para substituição do asbesto, um mineral com propriedade carcinogênicas, proibido em diversos países, que provoca asbestose, uma doença respiratória que ocorre devido ao acúmulo de fragmentos deste material nos pulmões (Passos, 2005).

O novo produto foi desenvolvido a partir de uma mistura de cimento, resíduos siderúrgicos, fibras vegetais (de bananeira, sisal, coco, eucalipto ou outras plantas) e sintéticas. Seu nome técnico é fibrocimento vegetal.

Ensaios mecânicos de tração, testes físicos de permeabilidade, densidade e absorção de água comprovaram a eficiência do produto em substituição ao fibrocimento tradicional. Além de apresentar algumas vantagens, entre elas, a maior capacidade de isolamento térmico, leveza e durabilidade equivalente ao fibrocimento com asbesto. Entretanto, sua maior vantagem é que não oferece riscos à saúde (Castilhos, 2011)

Outra possibilidade é a produção de compósitos com celulose de papel usado e fibras de coco para a utilização em coberturas de edificações, substituindo os compósitos tradicionais (Passos, 2005).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112042/CA

2.6.6.2.
Fibra da Casca do Coco Verde como Substrato Agrícola

A fibra da casca de coco tem isso usada e estudada por pesquisadores em todo o mundo com um substrato agrícola. Carrijo, et al.,(2002) afirma que as propriedades físico-químicas das fibras apresentam são de boa qualidade, ideais para o uso no cultivo. Além disso, a grande percentagem de lignina (35-45%) e de celulose (23-43%) e a pequena quantidade de hemicelulose (3-12%), que é a fração prontamente atacada por microrganismos, conferem ao substrato de fibra de coco uma grande durabilidade (Noguera et al., 2000), sendo desta maneira, recomendável para cultivos de ciclo longo como as ornamentais. É também ideal para o cultivo de hortaliças sem o uso do solo, pois não sofre o processo de degradação acelerado causado pelo intensa aplicação de água e fertilizantes.

A comparação da fibra de coco com outros sete tipos de substratos estudados mostrou uma leve superioridade da fibra de coco em termos absolutos na produção comercial de tomate, produzindo cerca de 1 tonelada a mais de frutos comerciais que o pó de serra ou serragem em três anos de avaliação (Carrijo et al., 2002).

As boas propriedades físicas da fibra de coco, a sua não reação com os nutrientes da adubação, sua longa durabilidade sem alteração de suas características físicas, a possibilidade de esterilização, a abundância da matéria prima que é renovável e o baixo custo para o produtor faz da fibra de coco verde um substrato dificilmente superável por outro tipo de substrato, mineral ou orgânico no cultivo sem solo de hortaliças e flores.

2.6.6.3.
Adição de Fibras de Coco em Concreto não Estrutual

Diversos estudos sobre adição de fibras em concreto com intuito de melhoramento das propriedades do concreto convencional foram realizados entre eles a adição da fibra de coco (Bento *et al.*, 2008).

Ensaios laboratoriais foram realizados para avaliar as vantagens e desvantagens para a utilização do concreto acrescido de fibras de coco. Para a análise utilizou-se duas composições de concreto. A primeira havia brita, areia, cimento, água e fibra de coco. A segunda não possuía a fibra. Foram feitos corpos

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112042/CA

de provas das duas amostras de concreto submetendo-as a testes de tração e compressão para então compara-los (Bento *et al.*, 2008).

O concreto composto com a fibra de coco apresentou resultado satisfatório apenas para a aplicação não estrutural onde não sofre grandes solicitações, pois a degradação da fibra em relação ao tempo não permite que ele suporte grandes esforços tanto de compressão como tração. Entretanto ele apresentou boa propriedade de vedação devido ao baixo módulo de elasticidade, além de isolamento acústico e térmico (Bento *et al.*, 2008).

2.6.6.4. Adição de Fibras de Coco em Misturas Asfálticas

Com o aumento do volume de tráfego e da carga dos veículos nas rodovias, a preocupação em desenvolver pavimentos de alta durabilidade e segurança que atendam os requisitos de custo e beneficio é cada vez mais importante, pois este é um fator que exerce forte influência na escolha do revestimento (Vale et al., 2007).

A utilização de uma camada de rolamento com misturas asfálticas mais resistentes e duráveis tem sido uma alternativa para a redução de custos de manutenção e operação das vias. Como resposta das pesquisas, obteve-se uma mistura de graduação descontínua chamada SMA. Esse tipo de mistura asfáltica tem sido muito utilizado na Alemanha, Bélgica, nos Estados Unidos e no Canadá. Sua aplicação tem sido realizada principalmente em vias de tráfego intenso, pesado e aeroportos (Vale et al., 2007).

A mistura SMA é um concreto asfáltico usinado a quente de alto desempenho estrutural e funcional, é utilizado como camada de aderência em pista molhada, na diminuição efetiva do borrifo de água pelos pneus, na redução da reflexão das luzes de faróis em noites chuvosas, e na redução de ruídos nas áreas lindeiras à via. A espessura de aplicação varia entre 1,5 a 7,0 cm, dependendo da faixa granulométrica. A formação de pequenos canais devido a sua macro-textura promove uma drenagem superficial bastante eficiente (Vale et al., 2007).

A composição da mistura SMA consiste basicamente em uma elevada quantidade de agregados graúdos (entre 70 a 80%) preenchidos por um ligante

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112042/CA

asfáltico (6 a 7%) e fibras, que penetram nos espaços vazios formando o revestimento. Este ligante aumenta o contato entre os grãos, formando um revestimento asfáltico resistente e impermeável com um volume de espaços vazios menor que 4% (Vale et al., 2007).

As principais fibras utilizadas na Europa e na América do Norte são as de celulose e minerais. As fibras de celulose apresentam vantagens em relação às minerais, devido ao fato de serem produzidas a partir de fontes renováveis (Vale et al., 2007).

No Brasil, devido a grande quantidade de coco produzida, a pesquisa utilizou a fibra deste fruto para avaliar sua aplicabilidade quando incorporada ao revestimento em substituição a celulose. A percentagem de fibra adicionada ao revestimento asfáltico varia entre 0,3 a 0,4%, apesar das fibras não exercerem influencia no desempenho da mistura após a compactação. Quando adicionada ela forma uma película ao redor do granulado retardando a oxidação, a penetração de umidade e a sua separação e, consequentemente, aumentando a resistência ao desgaste do concreto asfáltico produzido (Vale et al., 2007).

Foram realizados ensaios de resistência à tração, a fadiga, de escorrimento e resistência à tração retida por umidade induzida. Os valores encontrados foram comparados ao revestimento com a fibra de celulose. A fibra de coco apresentou boa eficiência com relação ao escorrimento, contudo apresentou dificuldade de trabalhabilidade devido ao seu comprimento, o que levou a concluir que ela não pode ultrapassar 20 mm de comprimento. Quanto à resistência a tração, o revestimento apresentou resultados satisfatórios, entretanto, nas análises de fadiga, os resultados foram equivalentes tanto com as fibras de celulose e coco como sem a presença delas (Vale et al., 2007).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112042/CA