

2

REVISÃO DA LITERATURA

No desenvolvimento deste Capítulo será apresentada uma breve revisão da literatura, necessária para abordar os temas sobre as técnicas do reforço de solos com fibras, suas definições e propriedades gerais. Será relatado um breve histórico dos primeiros trabalhos documentados sobre a utilização de fibras em solos, da mesma forma será apresentada uma revisão sobre as definições e propriedades gerais relacionadas com a melhoria e o reforço de solos, assim como dos materiais compósitos fibrosos. Aspectos técnicos sobre os mecanismos de interação entre solo e reforço, as alterações do comportamento dos solos causadas pela adição de fibras e as melhorias geradas na resistência ao cisalhamento dos compósitos serão também abordadas. Finalmente são apresentados estudos experimentais e generalidades sobre ensaios triaxiais de compressão. Com base na literatura nacional e internacional procurou-se citar toda a informação disponível até o momento sobre os assuntos em questão de forma que esta se consolide em conhecimento.

2.1

SOLOS REFORÇADOS

De acordo com Casagrande (2005) “entende-se por melhoria ou reforço de solos a utilização de processos físicos e/ou químicos que visem o melhoramento das propriedades mecânicas dos solos. Procura-se o aumento da resistência do solo tratado e a diminuição de sua compressibilidade e de sua permeabilidade. O termo melhoria de solos está associado ao tratamento através de processos químicos, enquanto que o termo reforço está associado à utilização de inclusões em aterros ou taludes”.

2.1.1

Desenvolvimento Histórico

Desde a antiguidade existe a necessidade de melhorar o solo existente, seja para ganhar resistência nos materiais que utilizavam na construção das estruturas que precisavam, como também para a melhoria do terreno onde seriam construídas. Entre os

métodos mais utilizados pode-se citar a adição de diferentes materiais nos solos, a fim de conseguir bases mais resistentes e duráveis, ao longo do tempo.

Fruto dessa necessidade, abundantes técnicas de melhoramento das características do solo e de seu comportamento foram desenvolvidas pelo homem. Segundo Van Impe (1989), do ponto de vista técnico, o melhoramento do solo é, provavelmente, a técnica mais antiga, comparando os métodos executivos comuns em Engenharia Civil. O conceito de reforço de solos com materiais que apresentam resistência à tração (fibras) é antigo, muito conhecido e empregado. Por volta de 3000 anos antes de Cristo, durante a construção de grandes templos religiosos, como o Ziggurats, pelos babilônios, eram utilizadas esteiras de cana como elementos de reforço. Em alguns Ziggurats, utilizavam-se como reforço adicional cordas com 0,05m de diâmetro, inseridas perpendicularmente ao talude e regularmente espaçadas nas direções vertical e horizontal (Silva, 2009). Também, em algumas das estradas que conectavam o Império Romano, foram encontrados vestígios de tecidos e peles utilizadas para propósitos de reforço. Indícios do emprego dessa técnica são, ainda, encontrados em partes da Grande Muralha da China.

Nos países andinos como Bolívia e Peru os Incas (Povos Aymaras) construíram também as ruas das cidades e acessos aos palácios com argila reforçada com lã de lhama, os muros dos lares eram construídos com adobe (argila reforçada com bambu e palha) podendo encontrar até hoje estruturas habitáveis, com mais de 600 anos. No interior do Brasil e em outros países, são conhecidas aplicações de mantas de folhas e galhos sobre camadas de solos moles antes da construção de aterros (Sotomayor, 2014).

No contexto moderno, as estruturas de contenção em solo reforçado começaram a ser empregadas no final dos anos 60, quando o arquiteto francês Henry Vidal patenteou a técnica denominada “Terra Armada” (Vidal, 1969), em que o reforço de solo consistia na introdução de tiras metálicas conectadas a painéis de concreto que compunham a face do maciço de solo. A utilização de geossintéticos de fibras no Brasil data do final dos anos 70 e início dos anos 80, com obras não só envolvendo aplicações em drenagem e filtração, mas também no reforço de solos. A técnica para reforçar o solo tem sido muito utilizada. Alguns dos materiais usados para esse fim são fibras diversas, vidro, borracha moída, geossintéticos e outros.

2.1.2

Tipos de fibras empregadas como reforço

Na atualidade já foram desenvolvidas e estudadas uma ampla variedade de fibras utilizadas em compósitos fibrosos. Avaliando suas características de comportamento, propriedades físicas, químicas e mecânicas, que por sua vez irão afetar o comportamento do material compósito, estando intimamente relacionadas ao material do qual são compostas no processo de fabricação. As fibras podem ser classificadas em poliméricas, metálicas, minerais e naturais, apresentadas brevemente a seguir.

2.1.2.1

Fibras Poliméricas

Até o dia de hoje diferentes tipos de fibras poliméricas têm sido empregadas como reforço de solos. Temos as chamadas fibriladas, que são as fibras que apresentam um formato trançado quando esticadas transversalmente, projetadas para que se “abram” durante o processo de mistura com o solo. Autores como Al Wahab & Al-Qurna (1995), Al Wahab & El-Kedrah (1995) e Nataraj *et. al.* (1996) tem estudado o comportamento destas fibras.

Outro formato também utilizado por alguns autores (McGown *et. al.*, 1978; Morel & Gourc, 1997) e que se diferencia um pouco do formato de fibra são as malhas, que proporcionam um maior intertravamento com as partículas do solo. Outro tipo, desenvolvido na França, chamado de Texsol, consiste em um filamento contínuo que é distribuído aleatoriamente dentro da massa de solo.

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

- a. **Fibras de Polipropileno:** as fibras de polipropileno são constituídas de um tipo de material que adquire uma consistência plástica com o aumento da temperatura, denominado termoplástico. Os polímeros termoplásticos são constituídos por séries de longas cadeias de moléculas polimerizadas, separadas entre si de forma a que possam deslizar umas sobre as outras (Hollaway, 1994). 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). Tais características conferem aos materiais a que estas fibras são incorporadas uma

substancial resistência ao impacto. Estas fibras são fornecidas em duas formas básicas as microfibras e as macrofibras.

- b. Fibras de Polietileno:** as fibras de polietileno têm um módulo de elasticidade baixo, são fracamente aderidas à matriz cimentada e altamente resistentes aos álcalis. Sua durabilidade é alta, mas apresentam maiores deformações de fluência, o que significa que, se elas forem utilizadas para suportar tensões altas permanentemente em um compósito fissurado, consideráveis alongações e deflexões podem ocorrer ao longo do tempo (Hannant, 1994). Procurando minimizar o problema da baixa aderência e módulo, tem sido desenvolvido o polietileno de alta densidade. A produção desta fibra resulta mais econômica em relação às demais.
- c. Fibras de Poliéster:** as fibras de poliéster apresentam alta densidade, rigidez e resistência, conferindo tais características às fibras feitas deste material. Essas fibras possuem um aspecto bastante similar às de polipropileno e podem ser utilizadas para as mesmas aplicações (Taylor, 1994). O poliéster atualmente mais conhecido é o polietileno tereftalato, cuja sigla é PET. É o material constituinte das garrafas plásticas de refrigerantes, águas minerais e óleos de cozinha, entre outros. Sua produção e consumo vêm aumentando muito rapidamente nos últimos anos. Somente no ano de 1996 no Brasil foram consumidas 150 mil toneladas de PET, o que representa um grande problema ambiental, pois se estima que somente 7% deste material é reciclado (revista Amanhã, junho de 1997).
- d. Fibras de Poliamida (Kevlar):** os polímeros contendo longas cadeias de moléculas geralmente possuem baixa resistência e rigidez, uma vez que suas moléculas são espiraladas e dobradas. Entretanto, se estas moléculas forem esticadas e reforçadas durante o processo de manufatura, altas resistências e módulos de elasticidade podem ser alcançados, como é o caso do Kevlar (Taylor, 1994). A fibra de poliamida aromática, comercialmente conhecida por Kevlar, é a fibra orgânica de maior sucesso. Existem dois tipos de Kevlar, o Kevlar 29, cuja resistência mecânica é da ordem de 3000 MPa e o módulo de elasticidade médio é de aproximadamente 64 GPa, e o Kevlar 49, cuja resistência é a mesma do anterior, mas seu módulo é de 300 GPa (Hollaway, 1994).

Apresenta-se a tabela 2, com as principais propriedades físicas dos quatro tipos de fibras:

Tabela 2: Propriedades das fibras Poliméricas (Hollaway, 1994)

Fibra	Resistência à tração (MPa)	Modulo de elasticidade (GPa)
Poliamida	3000	128
Polipropileno	400	8
Polietileno	24	1,1
Poliéster (PET)	130 - 880	4 - 15

2.1.2.2 Fibras Minerais

Dentre as fibras minerais podemos citar as de carbono, vidro e amianto (ou fibra de asbesto). A seguir serão apresentadas cada uma delas:

- a. Fibras de Carbono: baseadas na resistência das ligações entre os átomos de carbono e na leveza destas, as fibras de carbono apresentam alta resistência à tração e módulo de elasticidade em torno de 420 GPa. Características que tornam imprescindível uma grande aderência entre a matriz e as fibras (Taylor, 1994).
- b. Fibras de Vidro: geralmente manufaturadas na forma de “cachos”, isto é, fios compostos de centenas de filamentos individuais justapostos. O diâmetro dos filamentos individuais é geralmente da ordem de 10 μm (Taylor, 1994). Cerca de 99% das fibras de vidro são produzidas a partir do vidro tipo E, que é susceptível ao ataque dos álcalis.
- c. Fibras de Amianto ou asbesto: apresentam resistência à tração em torno de 1000 MPa e módulo de elasticidade em torno de 160 GPa, e apresentam uma ótima aderência com uma matriz composta por cimento. 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.

Apresenta-se a Tabela 3, com as principais propriedades físicas dos três tipos de fibras (Curcio, 2001).

Tabela 3: Propriedades físicas e mecânicas das fibras minerais (Curcio, 2001)

Fibra	Densidade (kg/dm³)	Alongamento na ruptura (%)	Resistência à tração (GPa)	Módulo de elast. "E" (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

2.1.2.3 Fibras Metálicas

As fibras de aço conduziram a um número considerável de pesquisas como método de melhoria das propriedades mecânicas de materiais de construção. 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.

A resistência à tração da fibra metálica é da ordem de 1100 MPa e o módulo de elasticidade é de 200 GPa. Dependendo do meio a que estão inseridas, podem apresentar problemas de corrosão. Uma técnica utilizada para minimizar tal problema é o banho de níquel (Taylor, 1994). Seu formato pode ser bastante variável, de forma a aumentar sua aderência com a matriz (Hannant, 1994).

2.1.2.4 Fibras Vegetais

Os primeiros tipos de fibras empregadas na história da humanidade foram as fibras vegetais. Estas fibras são classificadas de acordo com sua origem nas plantas e podem ser agrupadas em fibras de caule, fibras de folha, fibras de semente e fibras de fruto. Existem cerca de 250.000 espécies de plantas superiores, mas menos de 0,1% são comercialmente importantes como fontes de fibras (Young, 1994). As fibras vegetais utilizadas em materiais compósitos podem ser de bambu, juta, capim elefante, malva, coco, piaçava, sisal, linho e cana-de-açúcar (Hannant, 1994). Algumas destas fibras podem atingir grandes resistências, como, por exemplo, as fibras do bambu que atingem, normalmente, resistências acima de 100 MPa, com módulo de elasticidade entre 10 e 25 GPa. Na tabela 4 apresenta-se uma classificação mais detalhada dessas fibras.

Tabela 4: Principais fontes de fibras vegetais (Young, 1994)

Parte da planta de onde são extraídas as fibras	Espécie
Caule	Linho
	Juta
	Cânhamo
	Kenaf
	Bagaço de cana
Folhas	Sisal
	Rami
	Curauá
	Bananeira
	Abacaxi
Sementes	Algodão
	Kapok
Frutos	Coco
	Açaí

A avaliação da durabilidade dos compostos formados com fibras vegetais é o principal problema a ser investigado, pois podem ser degradadas por fungos e outros micro organismos. Segundo Teodoro (1999), a exposição das fibras vegetais em ambientes alcalinos causa uma rápida degradação das fibras. Como por exemplo, o emprego das fibras vegetais como reforço de materiais cimentados com cimento Portland comum. Apresenta-se a tabela 5, com as principais propriedades físicas de diferentes tipos de fibras vegetais.

Tabela 5: Propriedades físicas e mecânicas das fibras vegetais (Bledzki e Gassan, 1999; Motta, 2006; Levy Neto e Pardini, 2006; Spinacé *et. al.*, 2009)

Fibra	Densidade (g/cm ³)	Deformação máxima (MPa)	Resistência à tração (MPa)	Modulo de elasticidade (GPa)
Coco	1,18 - 1,29	30	106 - 175	4,0 - 6,0
Algodão	1,5 - 1,6	7,0 - 8,0	287 - 597	5,5 - 12,6
Abacaxi	1,4	-	413 - 1627	34,5 - 82,5
Banana	1,35	-	54 - 754	7,7 - 20,0
Cânhamo	-	1,6	690	-
Curauá	1,1	-	700 - 1000	26,0 - 46,0
Juta	1,3 - 1,45	1,5 - 1,8	393 - 773	26,5
Linho	1,5	2,7 - 3,2	345 - 1035	27,6
Palmira	1,09	-	180 - 215	4,4 - 6,1
Rami	1,51	1,8 - 5,3	400 - 938	25,0 - 128
Sisal	1,5	4,0 - 5,4	511 - 640	9,4 - 22
Talipot	0,89	-	143 - 264	9,3 - 13,3

Das fibras anteriormente apresentadas pode-se dizer que com a adição das mesmas é possível aperfeiçoar as propriedades mecânicas dos solos, como a resistência, flexão, tração e impacto. Na maioria dos casos, o maior benefício obtido por reforçar materiais frágeis com fibras é a melhoria do comportamento após a fissuração da matriz. Apresentando uma deformação plástica considerável que faz dele um material interessante para a construção.

Comparando os resultados destes compósitos em relação aos reforços poliméricos as fibras naturais apresentarem baixos custos, estimulando as pesquisas para viabilizar o uso de fibras vegetais conseguindo propriedades adequadas em relação à resistência mecânica.

Nos últimos anos, a produção de pesquisas e artigos alusivos a compósitos utilizando fibras vegetais aumentou admiravelmente (Faruk *et. al.*, 2012). A maioria das pesquisas que vêm sendo desenvolvidas em termos de reaproveitamento de fibras vegetais no âmbito da construção civil, é mais especificamente em concretos e argamassas. (Silva *et. al.*, 2012). As argamassas e concretos são formados por aglomerados minerais que constituem as matrizes cimentícias. As matrizes mais utilizadas na construção são aquelas com base no cimento Portland, cal e gesso. A adição de fibras nas matrizes melhora as propriedades mecânicas e altera o comportamento após fissuração, diminuindo os efeitos de uma ruptura brusca da matriz cimentícia (Agopyan & Savastano, 2007).

Além disso, compósitos reforçados com fibras vegetais dependem de fatores importantes relacionados ao seu desempenho e aplicação. A escolha do tipo de fibra vegetal utilizada para reforço do solo dependerá das características desejadas no material compósito.

A variedade de fibras é ampla, mas a eleição deverá submeter-se à soma das características mecânicas, físicas e químicas da fibra e do método de mistura, que afetarão o comportamento do material compósito resultante. Portanto, as características da fibra e do solo contribuirão para o comportamento final do compósito, gerando um determinado mecanismo de interação matriz-reforço.

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

- A baixa massa específica;
- A maciez e abrasividade reduzida;
- O baixo custo;
- É reciclável, não é tóxica e biodegradabilidade;
- O estímulo a empregos na zona rural;

- O baixo consumo de energia em sua produção;
Como desvantagens, é possível citar:
- A acentuada variabilidade em suas propriedades mecânicas;
- A sensibilidade a efeitos ambientais (variações de temperatura e umidade) ;
- A presença de seções transversais de geometria complexa e não uniforme;
- As propriedades mecânicas modestas quando comparadas às fibras sintéticas (fibra de carbono, de vidro, etc.);

Uma característica essencial que deve ter a fibra para reforço do solo é não ser quimicamente neutra e não deteriorável, não sofrer ataque de fungos, bactérias ou álcalis e não ser prejudicial à saúde humana (Casagrande, 2005).

Na presente dissertação a fibra escolhida é a fibra de coco, material que é 100% vegetal, pelo qual os problemas de degradação são inerentes ao material, devido às reações químicas em presença da água e oxigênio, é um material que tem menor resistência à tração e é mais flexível na deformação, propriedade que ajuda em grande forma na diminuição da propagação de fissuras e aumenta a resistência ao cisalhamento no solo. O presente estudo possui um enfoque no comportamento da fibra de coco como material para reforço do solo, além de ser aplicada a impermeabilização da fibra com algum reativo químico, com o fim de prevenir a degradação do material ao longo do tempo e garantir soluções a prazos maiores.

2.2 ESTUDOS EXPERIMENTAIS DA FIBRA DE COCO

No desenvolvimento deste tópico foram utilizados estudos que aportam informação relevante à presente pesquisa referidos unicamente ao comportamento da fibra de coco.

2.2.1 Fibra de coco verde

As fibras de coco são extraídas da porção externa do fruto da palmeira de coco (*Cocos nucifera* L.), normalmente considerado um subproduto. Há duas variedades de palmeira de coco: a normal, que pode atingir até 30 metros, e a anã, que não ultrapassa 3 metros. No entanto, as características são as mesmas. O tronco é cilíndrico e carrega no topo um tufo de folhas arqueadas com 3 a 6 metros, divididas em folíolos. Os frutos dão origem sob as folhas. Em cada fruto contém uma semente, onde no interior se encontra uma massa branca, adocicada e saborosa que se espessa à medida que o fruto amadurece.

No fruto verde, a massa é menos espessa e menos dura, com grande quantidade de água (água de coco).

A fibra de coco utilizada foi obtida pelo processo mecânico da empresa ECOFIBRA, que possui uma parceria com a Companhia de Limpeza Urbana da cidade do Rio de Janeiro (COMLURB) em projeto piloto de coleta seletiva das cascas de coco verde. A figura 1 apresenta o processo para a obtenção da fibra.



Figura 1: Processo de obtenção da fibra de coco

2.2.2 Propriedades mecânicas das fibras de coco

Para definir as propriedades físicas e mecânicas das fibras de coco foram realizados diversos trabalhos, onde os diâmetros variavam de 131 a 229 (μm), característica comum nas fibras vegetais (diâmetros variáveis), com fibras de 20 mm de comprimento. Os trabalhos mostram que a variabilidade nos resultados experimentais não foi muita devido à variação do diâmetro. Através das curvas de tensão vs. deformação, foi determinado o módulo de elasticidade a partir da porção linear inicial da curva. A tensão de ruptura foi determinada como a última tensão na qual a fibra suportou, na região última de deformação plástica, atingindo a valores de 37,54 a 182,2 (MPa) estes fatores apresentam uma tendência de aumento em relação à velocidade de ensaio (Tomczak, 2010).

Na tabela 6 apresentam-se diferentes propriedades da fibra de coco determinadas por diferentes pesquisadores em diferentes estudos:

Tabela 6: Propriedades físicas da fibra de coco (Tomczak, 2010).

Fonte dos dados	Diâmetro (mm)	Resistência última à tração (MPa)	Modulo Elástico (GPa)	Deformação na ruptura (%)
Kulkarni (1981)	0,10 - 0,45	106 - 175	3,00 - 6,00	17 - 47
CEPED (1982)	0,70	182,2	3,40	28,27
Ramaswamy (1983)	0,20 - 0,25	140	-	26,25
Paramasivam (1984)	0,30	69,3	2,00	-
Guimaraes (1984)	-	180	2,80	29,2
Ghavami e Veloso (1985)	0,24 - 0,42	37,53 - 110,52	-	10,47 - 27,77
Aziz (1987)	0,10 - 0,40	120 - 200	19,00 - 26,00	10 - 25
Satanarayana (1990)	0,10 - 0,45	106 - 175	4,00 - 6,00	17 - 47
Aggarwal (1992)	0,10 - 0,40	100 - 130	0,019 - 0,026	10 - 26
Toledo Filho (1997)	0,25	174	3,50	25
Savastano e Agopyan (1998)	-	95 - 118	2,80	23,9 - 51,4
Fabio Tomczak (2010)	0,13 - 0,23	100 - 250	3,00	30,0

A influência do diâmetro da fibra pode ser explicado em termos de propriedades estruturais das fibras. Com o aumento do diâmetro, há variações no número de células constituintes, alterando outros parâmetros estruturais, tais como ângulo helicoidal, volume das células constituintes e número de defeitos. Todos estes fatores influem diminuindo a resistência das fibras. A deformação na ruptura não apresenta relação com o diâmetro das fibras, o valor obtido na deformação de ruptura é de 30% (Tomczak, 2010).

2.2.3 Morfologia fibra de coco

A microscopia da seção transversal da fibra de coco é mostrada na Figura 2. Através destas imagens é possível observar que as fibras são compostas de diferentes tipos de células regularmente arranjadas com uma lacuna no centro da fibra. As células

apresentam formas circulares, formando um ângulo helicoidal das microfibrilas igual a 45° aproximadamente, sendo um dos maiores nas fibras orgânicas, normalmente um alto teor de celulosa e um baixo ângulo helicoidal produzem uma fratura da fibra antes de atingir uma elongação de 4% (Tomczak, 2010).

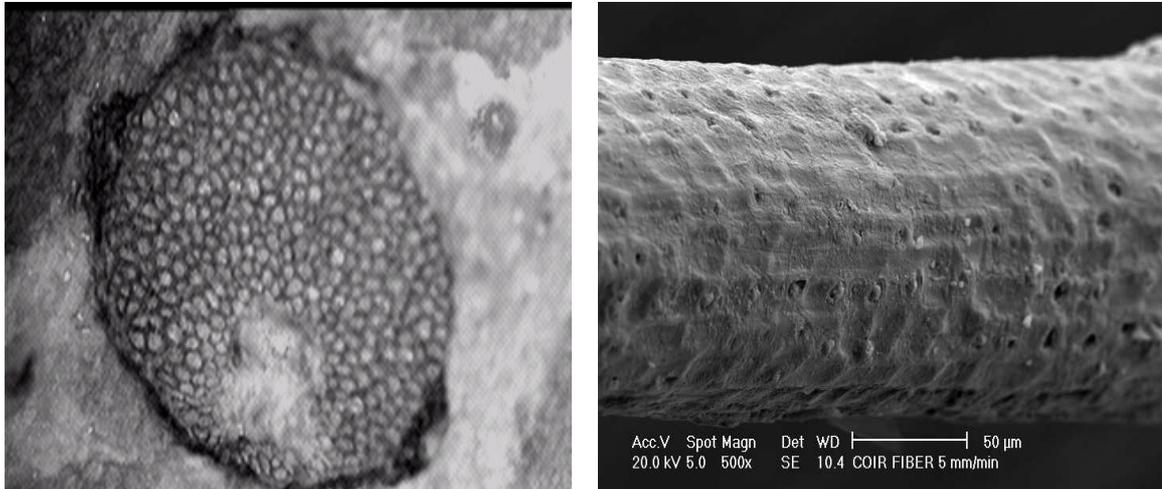


Figura 2: Microscopia ótica das fibras de coco (Esq.) corte transversal, (Der.) superficial.

As fibras são constituídas principalmente de celulose, hemicelulose, lignina, pectina e outras substâncias solúveis em água, além de ceras. O alto teor de lignina faz com que a degradação da fibra de coco seja mais lenta que a de outras fibras vegetais (Hejazi *et al.*, 2012). Segundo artigos apresentados pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) o tempo de degradação da casca de coco é de 10 anos.

2.2.4 Efeitos térmicos

A análise térmica nos fornece informações a respeito da composição e estabilidade térmica. Em atmosfera inerte, a degradação inicial ocorre em torno de 200°C. Em atmosfera oxidante, a degradação ocorre de uma forma muito mais complexa. A perda de massa inicial em ambas as condições são muito próximas, 6,4% em nitrogênio e 7,9% em oxigênio. Outras perdas de massa são observadas nas seguintes temperaturas: 259,2 e 313°C, com 19,1 e 47,6% para atmosfera de nitrogênio e 64,1 e 28% de perda de 64,1 e 28% em 274 e 348°C para atmosfera de oxigênio. A perda de massa inicial entre a temperatura ambiente e 150°C pode ser atribuída à eliminação de água presente na fibra. A degradação inicial das fibras ocorre em torno de 200°C e 180°C para as atmosferas de nitrogênio e oxigênio. No processo de pirólise é possível identificar as regiões de degradação dos componentes das fibras (Tomczak, 2010).

A análise dinâmica mecânica das fibras fornece informações a respeito de seu comportamento mecânico com a variação de temperatura. O módulo de armazenamento (medida da energia mecânica que o material é capaz de armazenar) diminui com o aumento da temperatura, apontando as transições térmicas da fibra de coco. Após a secagem da fibra, ocorre um aumento dos valores do módulo de armazenamento pela eliminação da água presente em sua estrutura. Avaliando os valores de módulo de armazenamento a 25°C, a fibra em seu estado natural apresenta um valor de 2.645 MPa, próximo a valores de módulo elástico encontrados nos ensaios mecânicos de tração da fibra. Com a eliminação da água, o módulo de armazenamento a 25°C aumenta para 3.521 MPa, representando um aumento de 30% (Tomczak, 2010).

2.2.5

Durabilidade das fibras em ambientes alcalinos

Em estudos realizados pelo Toledo Filho (1997), foi identificado que as fibras naturais podem sofrer vários graus de degradação quando expostas a um ambiente alcalino. A intensidade do ataque, determinada pela perda de resistência da fibra, depende do tipo de fibra e de solução alcalina. Os mecanismos de degradação alcalina das fibras naturais foram discutidos por Gram (1983), assumindo os seguintes mecanismos de decomposição:

- O efeito de "Peeling- Off" no qual o fim da cadeia molecular é despreendido e os grupos terminais são continuamente liberados. Isso ocorre como resultado da reação entre o terminal redutivo da cadeia de íons OH^{-1} .
- A hidrólise alcalina, que provoca a divisão da cadeia molecular e reduz o grau de polimerização de celulose. Considerando-se que a divisão da cadeia molecular expõe novos terminais redutivos, o mecanismo de "peeling-off" pode ser iniciado.

Toledo Filho (1997) avaliou a durabilidade das fibras de coco e sisais submetidos a três tipos de tratamento:

- Fibras imersas em água de torneira de pH 8,3 (tratamento 1).
- Fibras imersas em uma solução de hidróxido de cálcio de pH 12 (tratamento 2).
- Fibras imersas em uma solução de hidróxido de sódio de pH 11 (tratamento 3).

As fibras foram armazenadas em vasos cheios das soluções por um período de 420 dias, os vasos foram cobertos e o pH das soluções medido em intervalos regulares de tempo, soluções que não mantinham os valores desejados de pH eram substituídas.

Tabela 7: Resistência à tração das fibras de coco submetidas a degradações químicas

Condicionamento		Fibra de coco
Tipo	Duração (dias)	Resistência à tração (MPa)
Grupo de controle	0	178,68
Tratamento 1	30	176,54
	60	167,25
	90	177,67
	120	178,26
	210	176,41
	300	150,72
	420	138,07
Tratamento 2	30	152,22
	60	175,29
	90	176,75
	120	131,41
	210	104,94
	300	-
	420	-
Tratamento 3	30	159,48
	60	178,50
	90	177,38
	120	137,07
	210	154,15
	300	130,40
	420	108,79

Os valores da resistência à tração das fibras foram determinados usando-se uma máquina de tração com capacidade máxima de 200 N. A carga foi aplicada a uma velocidade de cerca de 20 mm/min. Os testes foram executados após 0, 30, 60, 90, 120, 180, 210, 300 e 420 dias de imersão nas soluções ou em água. O número de fibras ensaiadas foram 210 (30 fibras testadas em cada idade). As fibras foram ensaiadas secas (secadas ao ar 24 horas antes do teste) com um comprimento de 65 mm. apresentando os resultados na tabela 7.

O comportamento das fibras condicionadas em água de torneira (tratamento 1) perderam resistência com o tempo, provavelmente em razão da ação microbiológica. Os resultados mostram que após 420 dias, as fibras de coco retiveram 77,2% da sua resistência original.

Uma redução significativa na resistência pode ser observada para as fibras de coco condicionadas na solução de hidróxido de cálcio (tratamento 2). Os resultados mostram que após 210 dias as fibras de coco mantiveram 58,7% de sua resistência original. Após 300 dias, no entanto, toda a sua resistência tinha sido perdida. Quando secas as fibras perderam completamente sua flexibilidade e podiam ser facilmente separadas pela força imposta pelos dedos.

Para as fibras condicionadas na solução de hidróxido de sódio (tratamento 3) também apresentaram uma redução na resistência. Os resultados mostram que após 420 dias, as fibras retiveram 60,9% de sua resistência original. A partir dos resultados, nota-se que a intensidade do ataque alcalino foi maior no tratamento 2.

2.2.6

Tratamento para a impermeabilização das fibras de coco

O estudo realizado por Toledo Filho (1997) faz menção aos estudos de Gram (1983), que fez diferentes tratamentos nas fibras de sisal com o objetivo de melhorar a durabilidade das mesmas, aplicando distintos agentes bloqueadores, como por exemplo, silicato de sódio, sulfito de sódio, sulfato de magnésio, composto de ferro ou cobre, etc., mas nenhum deles melhorou a durabilidade da fibra na matriz de cimento. A impregnação da fibra com agentes repelentes de água foi também usada pelo autor levando a um retardo da tendência de fragilização dos compósitos, sem impedir a mineralização das fibras. Dentre todos os intentos de Gram (1983) é nomeada a utilização da micro-sílica aplicada à fibra de sisal mediante a imersão da solução antes de ser incorporada na matriz de cimento-fibra, ideia que nasceu de Bentur e Diamond (1987) no tratamento de filamentos de fibras de vidro com o objetivo de reduzir os ataques químicos (alcalinos e de mineralização) criando uma zona de baixo pH ao redor das fibras com o objetivo de evitar, ou reduzir, o ataque alcalino e o transporte dos produtos de cálcio para as fibras naturais.

O tratamento das fibras de sisal foi realizado pela imersão das fibras na micro-sílica líquida por 10 minutos, seguida da remoção e secagem ao ar por 15 minutos. Os resultados deste tratamento demonstram que é um método efetivo para melhorar a resistência e tenacidade dos compósitos com o tempo. A presença de minúsculas partículas de micro-

sílica na interface fibra-matriz cria uma zona de baixa alcalinidade ao redor da fibra que retarda ou previne a mineralização da fibra em razão da migração de produtos de cálcio, observando-se em micro gráficos que a superfície da fibra tratada depois de 322 dias de envelhecimento não apresenta significantes sinais de deterioração, (Toledo Filho, 1997).

2.3 MECANISMOS DE INTERAÇÃO SOLO-FIBRA (ESTUDOS EXPERIMENTAIS)

As interações entre o solo e a fibra estão ligadas a diversos fatores que vêm sendo estudados por diferentes autores que avaliaram o comportamento dos solos reforçados, segundo as variações dos parâmetros de resistência e deformabilidade. Neste sentido, no presente tópico, são apresentados os resultados de pesquisas que visavam encontrar os principais mecanismos que governam o comportamento dos materiais reforçados, com a aplicação de diferentes tipos de fibra, e preferentemente com a fibra de coco.

McGown *et. al.* (1978) avaliaram o efeito de distintos elementos de reforço em um solo arenoso, nos estados denso e fofo. Os autores observaram que o comportamento de tensão deformação do solo reforçado está ligado, fundamentalmente, às características de resistência e deformabilidade dos elementos de reforço. Eles propuseram a divisão de reforço de 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. Sua principal função é, então, a de aumentar a ductilidade e a de diminuir a perda de resistência pós-pico, além de acrescentar resistência mecânica. Já o elemento de reforço não extensível tem deformação de ruptura menor que a máxima deformação de tração no solo sem reforço, conferindo, portanto, ganho de resistência mecânica, porém, rupturas catastróficas podem ocorrer se o reforço romper-se.

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 vegetais, sintéticas e metálicas. A partir dos resultados obtidos nos ensaios, eles chegaram à conclusão de que a inclusão da fibra aumenta a resistência ao cisalhamento de pico e reduz a queda pós-pico. As fibras curtas comportaram-se como uma inclusão extensível, ou seja, não se romperam durante o ensaio. O aumento do comprimento das fibras resultou num aumento da resistência, porém, esse aumento é verificado até certo limite, a partir do qual o referido efeito não é mais observado. A orientação das fibras com relação à superfície de cisalhamento também é considerada no modelo. Na figura 3 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.

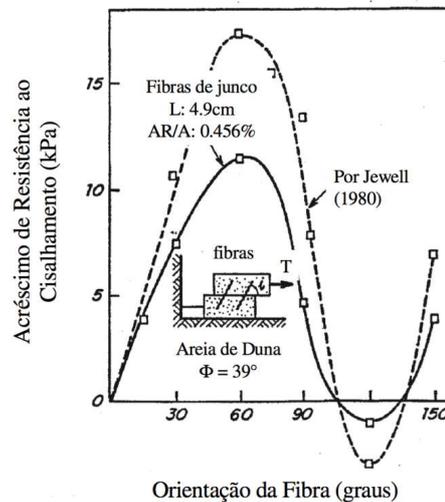


Figura 3: Acréscimo de resistência em função da inclinação da fibra (Gray e Ohashi, 1983)

Freitag (1986) examinou os efeitos da inclusão de fibras na resistência à compressão simples de um solo residual de calcário compactado, segundo uma larga faixa de teores de umidade. Foram usadas fibras sintéticas diferentes de 20 mm de comprimento e o teor adicionado foi de 1% em volume. Os resultados indicaram que houve aumento da resistência à compressão não confinada, principalmente para teores de umidade próximos à ótima e no ramo úmido da curva de compactação. As curvas tensão versus deformação mostraram que o solo reforçado rompe em uma deformação bem superior à do solo não reforçado, sendo capaz de absorver maior energia de deformação.

Gray e Maher (1989) analisaram a influência de diversos parâmetros das fibras e dos solos sobre o comportamento tensão-deformação das misturas. Neste trabalho, as fibras foram distribuídas aleatoriamente dentro do solo. Uma das principais vantagens de fibras distribuídas aleatoriamente é a manutenção da resistência isotrópica e a ausência de planos de fraqueza que podem ser desenvolvidos em sistemas de reforço orientado. Os autores verificaram a existência de uma tensão de confinamento crítica, onde o aumento do fator de forma na fibra (l/d) resulta na redução desta tensão de confinamento crítica e torna mais efetiva a contribuição da fibra no aumento da resistência ao cisalhamento.

Shewbridge e Sitar (1989) avaliaram o mecanismo de desenvolvimento da zona de cisalhamento de um solo granular reforçado com vários tipos de fibras. Foram realizados

ensaios em equipamento de cisalhamento direto, cujas dimensões eram maiores que as convencionais. Para o solo reforçado, a zona de cisalhamento era mais larga e aumentava com a concentração, a rigidez e a aderência entre o solo e o reforço. Após um amplo programa experimental, os autores concluíram que o aumento da resistência é função das propriedades da areia: graduação, tamanho, forma das partículas e o aumento do coeficiente de uniformidade da areia, e da fibra: teor, relação l/d e módulo de elasticidade. A resistência diminui com o aumento do tamanho médio e da esfericidade das partículas de areia. O modelo proposto pelos autores para prever o comportamento do solo reforçado com fibras é baseado num modelo aplicado a concreto reforçado com fibras. Em geral, há um razoável ajuste entre os valores experimentais e os previstos pelo modelo. Entretanto, há, ainda, a necessidade de um melhor refinamento do modelo, principalmente em relação à estimativa da espessura da zona de cisalhamento.

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

As propriedades mecânicas e hidráulicas de um compósito caulinita/fibra foram estudadas por Maher e Ho (1994) por meio de ensaios de compressão não confinada, compressão diametral, flexão e condutividade hidráulica. Foram utilizadas fibras de polipropileno, vidro e celulose (madeira). Observou-se que a inclusão aleatória das fibras aumentou significativamente a resistência e a ductilidade do compósito, sendo este aumento mais visível em baixos teores de umidade. Para o mesmo teor de reforço, fibras mais curtas são mais numerosas dentro da matriz e existe uma maior possibilidade de elas estarem presentes na superfície de ruptura, contribuindo, assim, para o aumento da resistência. Contudo, após a ruptura, as fibras mais curtas são arrancadas de maneira mais fácil, o que denota a importância de fibras mais longas quando se deseja melhorar a ductilidade e a capacidade de absorção de energia. A adição de reforços fibrosos aumentou a permeabilidade da argila estudada, sendo mais visível em maiores teores de fibra.

As fibras não evitam a formação de fissuras, mas, ao acrescentar a resistência do solo e ao controlar a propagação de fissuras pelo incremento da resistência à tração (Taylor, 1994), a propagação de fissuras é amortizada, devido ao fato de que fibras mantêm juntas as interfaces das fissuras, melhorando, assim, as propriedades mecânicas no estado pós-fissuração e a ductilidade (Hannant, 1994). As fibras tendem a reforçar o compósito sobre qualquer modo de carregamento que induza uma tensão de tração – tração indireta, flexão e cisalhamento. Os principais parâmetros relacionados ao desempenho dos

materiais compósitos cimentados reforçados com fibras são apresentados a seguir, assumindo que as variações das propriedades descritas abaixo são atingidas independentemente (Taylor, 1994):

- Teor de fibra: um alto teor de fibras confere maior resistência pós-fissuração e menor dimensão das fissuras, desde que as fibras possam absorver as cargas adicionais causadas pela fissura;
- Módulo de elasticidade da fibra: um alto valor do módulo de elasticidade causaria um efeito similar ao teor de fibra, quanto maior o módulo maior a probabilidade de haver o arrancamento das fibras;
- Aderência entre a fibra e a matriz: as características de resistência, deformação e padrões de ruptura de uma grande variedade de compósitos cimentados reforçados com fibras dependem fundamentalmente da aderência fibra/matriz. Uma alta aderência entre a fibra e a matriz reduz o tamanho das fissuras e amplia sua distribuição pelo compósito;
- Resistência da fibra: aumentando a resistência das fibras, aumenta, também, a ductilidade do compósito, assumindo que não ocorra o rompimento das ligações de aderência. A resistência necessária dependerá, na prática, das características pós-fissuração necessárias, bem como do teor de fibra e das propriedades de aderência fibra-matriz;
- Comprimento da fibra: quanto maior for o comprimento das fibras, menor será a possibilidade delas serem arrancadas. Para uma dada tensão de cisalhamento superficial aplicada à fibra, esta trabalharia mais se o seu comprimento for suficientemente capaz de permitir que a tensão cisalhante desenvolva uma tensão que iguale à resistência à tração.

Dessa forma, é evidente a importância do comprimento e do diâmetro da fibra para manter juntas as interfaces das fissuras. Se a fibra tem uma alta resistência à tração, como, por exemplo, fibra de aço, então, a resistência de aderência necessária deverá ser alta para impedir o arrancamento, antes que a resistência à tração seja totalmente mobilizada ou deverão ser utilizadas fibras de alta relação l/d . Illston (1994) e Taylor (1994) apresentam as equações 2.5 e 2.6 do equilíbrio de forças idealizado no momento em que a fibra é solicitada no compósito, como demonstra a figura 4.

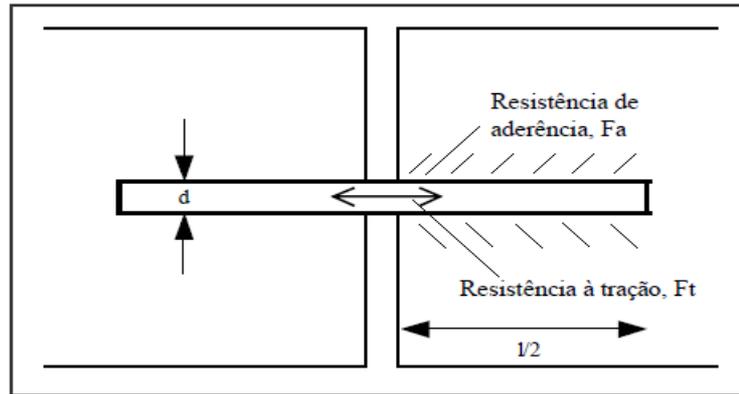


Figura 4: Disposição fibra/ fissura idealizada (Taylor, 1994)

$$\frac{\pi d^3}{4} * F_t = \pi d * \frac{1}{2} * F_a \quad (2.1)$$

$$\frac{l}{d} = \frac{F_t}{2F_a} \quad (2.2)$$

Nataraj *et. al.* (1996) apresentaram os resultados de uma série de ensaios de laboratório em solo arenoso e argiloso, ambos reforçados com fibras de polipropileno distribuídas aleatoriamente. Com a adição de fibras, não houve alterações significativas nos parâmetros de compactação do solo, porém, houve um aumento da resistência ao cisalhamento das areias, sendo o aumento mais observado em maiores teores de fibras. Independentemente do solo estudado, observou-se que a inclusão das fibras aumentou a resistência à compressão não confinada. Tanto o solo arenoso quanto o argiloso apresentaram valores de CBR maiores com a inclusão das fibras.

Teodoro e Bueno (1998) e Teodoro (1999) estudaram o comportamento de dois solos, um argiloso e outro arenoso, reforçados com fibras de polipropileno. Foram avaliados diferentes teores (0,1% a 1%) e comprimentos de fibras (10 a 30mm), por meio de ensaios triaxiais, compressão não confinada e cisalhamento direto. Foram executados painéis com solo de matriz argilosa com a finalidade de estudar o padrão de fissuramento deste material quando submetido a variações térmicas. Os autores concluíram que a inclusão de fibras melhora, no geral, a resistência ao cisalhamento e reduz a queda de resistência pós-pico do solo. No caso do solo arenoso, observou-se que as envoltórias tendem à bilinearidade à medida que o teor e o comprimento das fibras aumentam. O efeito da inclusão de fibras nos painéis executados com o solo argiloso foi o de reduzir a dimensão das trincas, sem, no entanto, evitar o fissuramento.

Montardo (1999), Montardo *et. al.* (2002) e Consoli *et. al.* (2002) investigaram os efeitos da inclusão de fibras sintéticas de diferentes propriedades mecânicas, distribuídas aleatoriamente, no comportamento de um solo arenoso, artificialmente cimentado e não

cimentado e chegaram às seguintes conclusões: (1) fibras relativamente rígidas – fibras de vidro e PET - exercem um efeito mais visível na resistência de ruptura, ao passo que fibras relativamente flexíveis, como as de polipropileno, exercem efeito mais visível no modo de ruptura e no comportamento último; (2) a inclusão de fibras PET ou de vidro aumentou tanto a resistência à compressão, quanto a resistência à tração da matriz cimentada, enquanto as fibras de polipropileno não aumentaram estas duas variáveis; (3) a inclusão de fibras de polipropileno no compósito cimentício alterou o comportamento do material na ruptura de frágil para dúctil, sendo que a inclusão das fibras PET e de vidro não modificou o modo de ruptura; (4) a inclusão de qualquer tipo de fibra aumentou a capacidade de absorção de energia de deformação de forma mais acentuada para comprimentos de fibra maiores; (5) 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) avaliou os efeitos da inclusão de fibras poliméricas de diferentes propriedades mecânicas, uma em forma de filamentos e outra fibrilada, formada por pequenos filamentos unidos, sobre as propriedades de resistência e deformabilidade de um solo residual artificialmente cimentado sob condições de carregamento estático e dinâmico. 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 vida de fadiga. Entretanto, as fibras de caráter inextensíveis - fibriladas - foram mais efetivas na redução da deformabilidade e no aumento de resistência de pico. Estruturas de pavimento semirrígido foram dimensionadas e 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, com 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 de 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, 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, em que 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 pelos

elementos de reforço, e uma etapa final, em que 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 em tal 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 concentram-se 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, tende a reduzir a fissuração; (b) a redistribuição de esforços, que causa a expansão da superfície de cisalhamento, tende a aumentar as deformações volumétricas de expansão.

Estudos experimentais realizados por Casagrande (2001) e Casagrande e Consoli (2002) em areia siltosa reforçada com fibras de polipropileno mostraram um crescimento constante da resistência com o aumento da deformação axial, caracterizando um comportamento elasto-plástico de enrijecimento. Segundo os autores, as fibras passaram a contribuir de forma mais significativa para o acréscimo da resistência a partir de 2,5% de deformação axial.

Heineck (2002) analisou o comportamento hidráulico e mecânico de novos materiais geotécnicos compósitos, tentando adequar suas características à utilização em barreiras hidráulicas. Foram adicionadas fibras de polipropileno de 24 mm e bentonita em amostras compactadas de solo, cinza, areia e caulim. Dentre as várias conclusões, cabe salientar que a adição de fibras aumenta os parâmetros de resistência ao cisalhamento (c , ϕ) e a resistência ao cisalhamento pós-pico dos compósitos, principalmente a baixas tensões efetivas médias iniciais e após grandes deformações.

Heineck e Consoli (2002) salientam que a influência da fibra a grandes deformações, no ensaio de ring shear, deve-se, provavelmente, à formação de uma zona de cisalhamento que, talvez, ocupe toda a espessura da amostra.

Vendruscolo (2003) avaliou as propriedades de resistência e deformabilidade de um solo arenoso cimentado e não cimentado por meio de ensaios triaxiais e execução de ensaios de placa de 0.30 m e 0.60 m de diâmetro, sobre camadas tratadas de 0.30 m de espessura. O autor concluiu que a influência desta inclusão sobre as propriedades mecânicas do compósito depende, fundamentalmente, das propriedades da matriz, em que o efeito da adição de fibras é mais evidente para maiores comprimentos e maiores teores de fibras, sendo seu efeito mais visível para materiais compósitos com maiores densidades. O

autor cita, também, que a influência das fibras na resistência de pico do material depende do diâmetro das fibras e da distribuição granulométrica do solo.

Consoli *et. al.* (2004) avaliaram o comportamento de uma areia cimentada e não cimentada reforçada com fibras. As fibras de polipropileno reduziram, drasticamente, a propagação de fissuras da areia cimentada, mudando o modo de ruptura de frágil para dúctil, para o maior comprimento de fibra estudado (36 mm), com o aumento da capacidade de energia absorvida, fato este não observado para os outros tipos de fibra estudados. Ou seja, não é possível estabelecer regras de comportamento sem o 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 K_0 , 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 K_0 diminuem com a inclusão de fibras e com o aumento do comprimento dessas fibras para todos os níveis de tensão, tanto no carregamento, quanto no descarregamento, mantendo-se, praticamente, constantes no carregamento e, crescentes, no descarregamento.

Casagrande (2005) estudou o comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno, submetidos a grandes deformações, que possuem características adequadas para o emprego em liners de cobertura de aterros sanitários e aterros sobre solos moles. O autor 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 amostras de areia e areia-fibra. Também foram executados ensaios do tipo ring shear nas matrizes de areia e bentonita, com e sem reforço e provas de carga em placa de 0.30 m de diâmetro sobre espessas camadas de areia compactada, reforçada e não reforçada com fibras. A adição de fibras ao solo aumenta tanto os parâmetros de resistência ao cisalhamento de pico, quanto à 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 se reduzir com o aumento das deformações cisalhantes. Por outro lado, 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 visível em misturas mais densas. O comportamento carga recalque do solo arenoso foi significativamente influenciado pela adição de fibras, aumentando, assim, a capacidade de suporte deste e alterando mecanismos de ruptura.

Donato (2007) avaliou a distribuição de tensões em um solo arenoso reforçado com fibras de polipropileno por meio de ensaios de prova de carga em placa circular de 0.30m 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 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, mostra-se mais efetiva a partir de certo nível de recalque e carga aplicada.

Festugato (2008) analisou o comportamento mecânico de um solo (areia fina), microrreforçado com fibras de polipropileno. Foram executados ensaios triaxiais com medidas internas de deformações em amostras de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. Após a realização dos ensaios, o autor concluiu que: (1) os microrreforços proporcionam ao solo um comportamento de endurecimento (hardening), que passa a ser mais visível a partir de um dado teor de fibras; (2) as fibras conseguem que a região de estados limite do material seja aumentada com a adição dos microrreforços.

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 delas, sem alterar as propriedades desejáveis na compactação e sem influenciar, negativamente, a condutividade hidráulica do solo quando utilizadas sob tensões confinantes.

Girardello (2010) avaliou o comportamento mecânico de uma areia não saturada, com e sem reforço de fibras de polipropileno, por meio de ensaios de placa em densidade relativa de 50% e 90%, ensaios triaxiais e ensaios de sucção. O melhor resultado foi obtido

no 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 mostrar-se mais efetiva, que ocorre somente após certo nível de recalque e de carga aplicada.

Costa (2011) estudaram o comportamento de misturas compostas por solo laterítico e tiras de borracha de tamanho médio de 1,40 mm. através de ensaios de cisalhamento direto em amostras com 0%, 10%, 20%, 40% e 50% de borracha. As envoltórias de resistência de todas as misturas apresentaram maiores valores de resistência ao cisalhamento do que do solo puro. O máximo incremento aconteceu para a mistura com um teor de borracha de 40%. O deslocamento horizontal onde acontece a tensão cisalhante máxima das misturas é maior do que do solo puro. Estes deslocamentos horizontais correspondentes à tensão cisalhante máxima aumentam com o maior o teor de borracha da mistura.

Lirer *et. al.* (2012) estudaram o comportamento de uma areia com pedregulho misturada com fibras de polipropileno e chegaram à conclusão de que a adição das fibras ao material oferece uma maior influência 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.

Sirvaitiene *et. al.* (2013) investigaram a influência das fibras vegetais pré tensionadas em tração nas propriedades mecânicas dos compósitos. Eles perceberam que a melhora significativa do desempenho de flexão é causada pelas forças de compressão residuais propagadas na matriz do polímero, obtidas apenas com elevados valores de pré tensão: próximo de 50 a 70 % da resistência final do reforço, enquanto que uma mínima carga de pretensão aumenta, significativamente, a resistência à tração do compósito. Assim, a técnica de pretensão é, particularmente, eficaz no caso de um compósito reforçado com fibras vegetais.

Bolaños (2013) realizou ensaios triaxiais em solo argiloso reforçado e não reforçado com fibra de coco verde, misturada em duas formas, moída e desfibrada em distintos teores, observando aumentos na resistência ao cisalhamento, e um leve aumento

no ângulo de atrito e um expressivo aumento na coesão das misturas reforçadas, em relação do solo argiloso puro. A mistura que atingiu melhores resultados é o solo argiloso com um teor de 1.5% de fibra em relação ao peso seco do solo. Recomendando o uso da mistura para obras de estabilização temporais.

Sotomayor (2014) avaliou o comportamento carga- recalque de uma areia reforçada com fibra de coco misturada em forma aleatória e em forma de manta, submetida a ensaios de placa em verdadeira grandeza, comparando os resultados com os resultados da areia pura, este estudo utilizou o material com as mesmas características mecânicas e físicas desta pesquisa. O comportamento das fibras em forma de manta conseguiu uma melhor distribuição das tensões, diminuindo os recalques em relação à areia sem reforço, a inserção aleatória das fibras conseguiu uma melhor inibição na propagação das fissuras, concluindo que ambos os formatos mostram ganho na resistência ao cisalhamento, recomendando-os para uso em obras geotécnicas como em liners de cobertura de aterros sanitários como também em aterros de solos moles, reduzindo a diminuição das deformações excessivas ocorridas nestes aterros.

2.4 ALTERAÇÕES NAS PROPRIEDADES DOS SOLOS PELA INCLUSÃO DE FIBRAS

No presente tópico serão descritas diferentes conclusões apresentadas por diversos autores sobre as mudanças das propriedades de distintos solos devido ao reforço dos mesmos com fibras de diferentes origens. Estas mudanças são relacionadas à compactação, resistência ao cisalhamento, deformabilidade, modo de ruptura, variação volumétrica, rigidez inicial e condutividade hidráulica.

2.4.1

Compactação

Sobre a compactação, Hoare (1979) avaliou o comportamento de um cascalho com areia compactado misturado com fibras de polipropileno. Observando que as fibras exercem certa resistência à compactação, resultando a mistura com maiores porosidades, 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 sugeriam ainda que a influencia na

compactação é comandada pela interação entre o solo e reforço, influenciando em aspectos como a granulometria do solo, forma das partículas, textura e área superficial do reforço.

Al Wahab & Al Qurna (1995) estudaram os efeitos da inclusão de vários teores de fibras geosintéticas (0%; 0,5%; 1% e 2% em relação ao peso do solo seco) na curva de compactação de uma argila. Os resultados encontrados mostraram 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) avaliaram 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 outras fibras (e.g. Maher e Ho, 1994; Ulbrich, 1997; Consoli *et. al.*, 1999; Casagrande, 2001; Heineck, 2002).

2.4.2

Resistência ao cisalhamento de pico

A seguir vamos descrever o comportamento da resistência ao cisalhamento de pico diferenciando dois tipos de solos (argilosos e granulares), ressaltando que nosso principal interesse são os resultados obtidos em solos arenosos com fibras, esta informação vai servir para entender melhor o comportamento dos compósitos. Esta é uma propriedade comumente referida como tenacidade, e representa o trabalho da fratura ou a capacidade de absorção de energia do compósito.

2.4.2.1

Material Argiloso

Segundo Maher & Ho (1994) a inclusão de fibras tem uma influência significativa nas propriedades mecânicas de argilas cauliníticas. Através de uma série de ensaios de compressão não confinada e diametral, os autores observaram um aumento do pico de resistência à compressão e à tração, assim como o aumento da ductilidade do material. Os mesmos autores constataram que o aumento da quantidade de fibras aumenta a resistência à tração e à compressão, porém, o aumento do comprimento das fibras diminui a contribuição destas para a resistência, tanto à compressão como à tração.

A umidade do solo no momento da compactação também afeta essas relações, sendo elas mais expressivas para menores umidades, como foi observado por Andersland & Kattak (1979) e por Nataraj *et. al.* (1996).

Al Wahab & Al-Qurna (1995), estudaram um composto de argila siltosa buscando maximizar os benefícios em termos de resistência, trabalhabilidade e homogeneidade, estabelecendo uma quantidade ótima de fibra, correspondente ao ponto de maior taxa de acréscimo de resistência não confinada com a adição de fibras. O teor ótimo de fibras reportado pelos autores é de 1%. Para altas quantidades de argila ou solos expansivos, Al Wahab & El-Kedrah (1995), citado pelos autores, observaram um teor ótimo de 0,2% de fibras.

Estudos comparativos entre um material granular e um coesivo foram realizados por Bueno *et. al.* (1996) mostrando que os solos coesivos são menos sensíveis ao aumento do comprimento das fibras. Análises baseadas em ensaios triaxiais revelaram um acréscimo no ângulo de atrito com a adição do reforço, sendo este maior quanto maior fora a quantidade de fibras.

Resultados apresentados por Lima *et. al.* (1996) para um solo silto-argiloso estabilizado com cal indicaram um aumento da relação entre a resistência à tração e a resistência à compressão com a adição de fibras. Os autores observaram também, através de ensaios triaxiais, um aumento do ângulo de atrito com a inclusão das fibras, porém sem uma tendência definida com relação ao aumento da quantidade de fibras. Com relação à coesão, houve um aumento com a adição do reforço para a matriz com teor de 4% de cal e houve um decréscimo para o caso da matriz com 8% de cal.

Com relação à coesão se chegou a um consenso de que esta é acrescida pela inclusão de fibras (Bueno *et. al.*, 1996; Nataraj *et. al.*, 1996; Teodoro, 1999; Heineck, 2002). Tal efeito não foi analisado por Andersland & Kattak (1979), que observaram ainda 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).

De diferentes análises baseadas em ensaios triaxiais pode-se revelar que há um acréscimo no ângulo de atrito com a adição do reforço, sendo este maior quanto maior for a quantidade de fibras, conforme resultados de Andersland & Kattak (1979), Al Wahab & El-Kedrah (1995), Teodoro (1999) e Heineck (2002).

2.4.2.2 Material Granular

Ranjan e Charan (1996) observaram que a curva tensão vs. 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.

O estudo realizado por Maher e Gray (1990), utilizou duas composições de bolas de vidro em lugar do solo, ambas com granulometrias uniformes, porém diferentes diâmetros médios das partículas, ele mostrou que o aumento do tamanho das partículas ($D_{50} = 0,25\text{mm}$ para $0,6\text{mm}$) não alterou a tensão de confinamento crítica, mas diminuiu a contribuição das fibras para a resistência.

Teodoro (1999) observou um aumento da resistência com o aumento do comprimento das fibras (comprimento máximo igual a 30 mm) de uma areia siltosa reforçada com fibras de polipropileno. Distinto comportamento o mesmo autor observou para um solo argiloso, onde o máximo de resistência foi alcançado para um comprimento de 15 mm.

Montardo (1999) relatou o aumento do ângulo de atrito interno de uma areia uniforme com e sem cimentação artificial, reforçada com diferentes tipos de fibras. Com relação ao intercepto coesivo, o autor somente encontrou um aumento para a areia não cimentada reforçada com fibras de polipropileno.

O aumento do ângulo de atrito e do intercepto coesivo com a inclusão de fibras e com o aumento do teor de fibras também foi relatado por diversos pesquisadores (Hoare, 1979; Gray & Ohashi, 1983; Bueno *et. al.*, 1996; Nataraj *et. al.*, 1996; Stauffer & Holtz, 1996). Porém, Teodoro (1999) e Casagrande (2001) observaram somente o aumento da parcela coesiva de uma areia siltosa reforçada, sem alterações significativas no ângulo de atrito. Por outro lado, Heineck (2002) constatou 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 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.

Segundo Vendruscolo (2003), as fibras possuem a característica de conferir um intercepto coesivo ao solo arenoso, além de proporcionarem um aumento do ângulo de

atrito, já para o solo cimentado, as fibras têm uma influência maior sobre a coesão última e o ângulo de atrito último.

Montardo (1999) e Consoli *et. al.* (2002-b) constataram o aumento do ângulo de atrito de uma areia uniforme cimentada e não cimentada reforçada com vários tipos de fibra de tipo sintéticas. Acréscimos da coesão somente foram verificados para a areia não cimentada reforçada com fibras. Resultados semelhantes também foram obtidos por Heineck (2002) para uma areia reforçada com fibras.

Acréscimos na resistência pela inclusão de fibras ao solo foram relatados por vários autores. Alguns constataram um aumento da resistência de forma linear com o aumento da quantidade de reforço (Gray & Ohashi, 1983; Gray & Al-Refeai, 1986), por outro lado, outros constataram um aumento não linear (Shewbridge & Sitar, 1989; Jewell & Wroth, 1987; Teodoro, 1999).

Outro ponto comum em termos de resistência observado por vários autores ao estudarem um solo granular reforçado foi a bi-linearidade das envoltórias de resistência (Gray & Ohashi, 1983; Gray & Al-Refeai, 1986; Maher & Gray, 1990; Stauffer & Holtz, 1996; Morel & Gourc, 1997; Kaniraj & Havanagi, 2001). Gray & Al Refeai (1986) observaram 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.

Com relação à granulometria do solo, Stauffer & Holtz (1996) realizaram vários ensaios triaxiais em duas areias reforçadas com distribuições granulométricas distintas, uma bem graduada e uma uniforme, porém com mesmo diâmetro médio (D_{50}) dos grãos do solo. Os autores observaram um aumento maior de resistência na areia bem graduada com a adição de fibras. A forma das partículas também é um fator que influencia na resistência do solo reforçado com fibras (Gray & Maher, 1989). A contribuição das fibras na resistência diminui com o aumento do índice de esfericidade das partículas, ou seja, partículas de solo mais arredondadas prejudicam a eficiência do reforço.

2.4.3

Resistência ao Cisalhamento Pós-Pico

Normalmente na maioria dos 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 & Ohashi, 1983; Gray & Al-Refeai, 1986; Fatani *et. al.*, 1991; Ranjan *et. al.*, 1996; Consoli *et. al.*; 1997-b, 1999, 2002-b; Donato *et. al.*, 2004). É

importante lembrar que o solo utilizado nesta pesquisa é arenoso, o qual usualmente apresenta só tensão pico em areias compactas (lambe & whitman, 1969).

2.4.4

Deformabilidade

McGown *et. al.* (1988), identificou 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 & Ho (1994) e Nataraj *et. al.* (1996), para argilas, relataram um aumento no módulo de deformação, tanto maior aumento 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 D_{50} 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.

Resultados de módulo de resiliência realizados por Donato (2004) permitiram verificar a grande importância da inclusão de fibras sobre a deformabilidade resiliente, onde o módulo é reduzido em 65%.

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. Percebendo 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.

Sotomayor (2014) estudou o comportamento da areia com fibra de coco distribuída em duas formas, na forma de manta diminui os recalques e deformações em corpos de grandes magnitudes em relação ao aumento de carga, além de atuar como membrana

absorvendo as deformações, na forma aleatória não evitam a deformação mas absorvem melhor a propagação das fissuras.

2.4.5

Modo de ruptura

Para o modo de ruptura, um parâmetro importante estudado é a ductibilidade, o qual foi observado de forma unânime por vários autores, ter um eminente aumento (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.

2.4.6

Varição Volumétrica

A adição de fibras aumenta as deformações volumétricas de compressão na ruptura, segundo relatos de Stauffer & Holtz (1996), sendo este aumento mais pronunciado para uma areia uniforme do que para uma areia bem graduada, ambas com mesmo diâmetro médio (D_{50}).

O aumento da compressibilidade do solo com a inclusão de fibras também foi observado por Bueno *et. al.* (1996). Segundo Shewbridge & 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).

2.4.7

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 & Cermák (2003) observaram que a adição de uma fibra sintética em um solo arenoso causou uma queda da 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.

2.4.8

Condutividade Hidráulica e outras propriedades

É relatado por diferentes autores o aumento da condutividade hidráulica devido à adição de fibras em solos argilosos. Maher & Ho (1994) observam um aumento na permeabilidade, sendo maior esse aumento quanto maior a quantidade de fibras. Já Al Wahab & El-Kedrah (1995) observam um aumento da condutividade hidráulica em mais de uma ordem de grandeza para 2% de fibra (polipropileno), tendo um efeito contrário em solos granulares segundo Bueno *et. al.* (1996).

Al Wahab & 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.

Feuerharmel (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.