

2. Revisão da literatura

2.1. Considerações iniciais

Neste capítulo, apresenta-se uma concisa revisão da literatura sobre solos reforçados com fibras, algumas definições gerais, alguns tipos de fibras para reforço e a revisão dos trabalhos documentados sobre a utilização de fibras como reforço, visando obter resultados que determinem os mecanismos de interação entre solo e reforço, as alterações do comportamento do solo, causadas pela adição de fibras, e as mudanças geradas pela melhoria da resistência.

Em seguida, será apresentada uma descrição geral das características das fibras de coco e as pesquisas feitas especificamente com relação ao reforço de solos com esse tipo de fibra.

Finalmente, serão abordados estudos experimentais e generalidades sobre ensaios de prova de carga em placa. Com base na literatura nacional e internacional, procurou-se citar toda a informação disponível até o momento sobre os assuntos em questão.

2.2. Solos reforçados

2.2.1. Desenvolvimento histórico

Desde a Antiguidade, o homem entendeu que há um sentido de praticidade em utilizar o solo existente no local em que se constrói uma estrutura de terra, mesmo que as características do solo, no local, não sejam as melhores e para aperfeiçoar as características desse solo, começou a realizar a adição de diferentes materiais, em sua maioria, orgânicos, a fim de conseguir uma estrutura resistente e durável, 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 caso do reforço de solos com fibras já é muito conhecido e empregado. O conceito de reforço de solos com materiais que apresentam resistência à tração é antigo. Por volta de 5000, 2500 anos atrás, durante a construção de grandes templos religiosos, como o Ziggurats, pelos babilônios, eram utilizadas esteiras de cana como elementos de reforço. Em alguns Ziggurats, utilizava-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.

No Peru, os incas construíram as estradas no Palácio do Sol e da Lua reforçadas com misturas de lã e argila. Muralhas de adobe reforçadas com bambu podem ser encontradas na cidade histórica de Chan-Chan, existentes há mais de 600 anos, feitas pela civilização anterior aos incas, numa zona de grande atividade sísmica.

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. A utilização, pelo Departamento de Estradas de Carolina do Sul-EUA, em 1926, de fibras de algodão para formar mantas foi uma das aplicações que mais se aproximou de um geossintético atual.

No contexto moderno, as estruturas de contenção em solo reforçado começaram 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.

2.2.2. Fibras como reforço de solos

As pesquisas sobre a utilização de fibras como reforço de solos começaram a acontecer há, aproximadamente, três décadas. Nos primeiros estudos, eram utilizadas fibras colocadas em forma aleatória dentro de uma massa de solo com a finalidade de avaliar o efeito das raízes das plantas na resistência ao cisalhamento dos solos (Gray & Ohashi, 1983).

Atualmente, a tecnologia de materiais compósitos tem um espaço preferencial para os estudos de reforço de solos com fibras, já que há a tendência ambiental de utilizar materiais recicláveis para evitar a geração de lixo, por isso, a comunidade científica propicia o constante desenvolvimento de pesquisas de tal jeito que, nos livros mais recentes de Engenharia dos Materiais, os materiais compósitos fibrosos são abordados em capítulos específicos. (Taylor, 1994; Hannant, 1994; Hollaway, 1994; Illston, 1994; e Budinski, 1996).

O melhoramento das propriedades mecânicas de um solo pode ser feito mediante processos físicos e/ou químicos, mas o termo melhoria de solos é, normalmente, associado ao tratamento químico, enquanto que o termo reforço é utilizado em tratamentos físicos, como no uso de adições de fibras em aterros ou taludes (Casagrande, 2005).

A degradação das fibras orgânicas propiciou a pesquisa de materiais sintéticos para reforço dos solos, gerando a fabricação de fibras sintéticas para formar materiais compósitos resistentes, como, por exemplo, o fibroso solo que consiste na mistura de solo e fibras sintéticas para utilização em pavimentos (Specht, 2000; Homem, 2002), aterros sobre solos moles, estabilidade de taludes (Zornberg, 2002) e em fundações superficiais (Casagrande et al, 2001).

As fibras contribuem de forma mais efetiva na resistência do solo no estado pós-fissuração, aumentando a capacidade do compósito no que diz respeito à absorção de energia. Isso se deve ao fato de que a deformação necessária para causar fissuras na matriz é muito inferior à elongação das fibras, nas quais pouco ou nenhum aumento de tensão de fissuração é esperado (Taylor, 1994; Illston, 1994; Hannant, 1994).

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 na fibra – tração indireta, flexão e cisalhamento –, portanto, melhoram a ductilidade e a tenacidade da matriz com características frágeis (Johnston, 1994).

Dessa forma, é evidente a importância do comprimento e do diâmetro da fibra para manter juntas as interfaces das fissuras. A relação entre o comprimento e o diâmetro da fibra (l/d) ou fator de forma é proporcional ao quociente entre a resistência à tração da fibra (F_t) e a resistência da aderência fibra/matriz (F_a). 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 um equacionamento do equilíbrio de forças idealizado no momento em que a fibra é solicitada no compósito, como demonstra a figura 2.1.

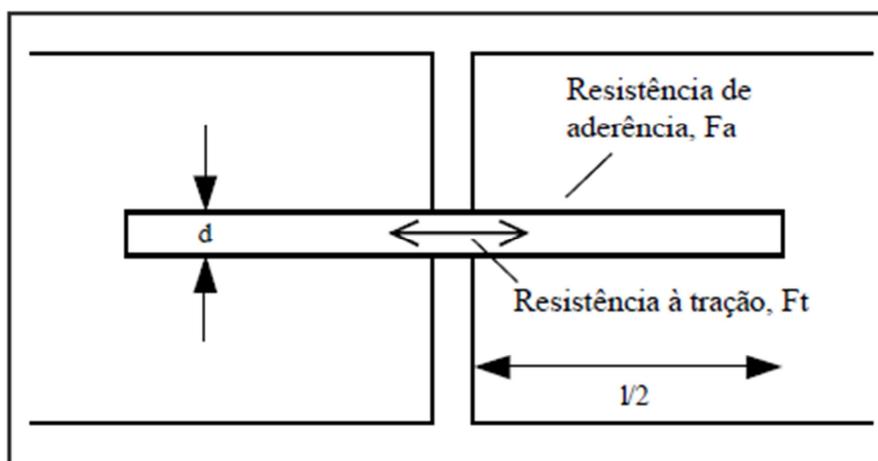


Figura 2.1 - Disposição fibra/fissura idealizada (Taylor, 1994)

$$\frac{\pi d^2}{4} \cdot F_t = \pi \cdot d \cdot \frac{l}{2} \cdot F_a \quad (2.1)$$

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

Além do comprimento e diâmetro da fibra, o desempenho de um compósito reforçado é conferido, principalmente, por conta do teor da fibra, pelas propriedades físicas da fibra e da matriz e pela aderência entre as duas fases (Hannant, 1994). Johnston (1994) também encontrou que existe um efeito da orientação e distribuição da fibra na matriz.

Conclui-se, deste modo, que o uso das fibras como material de reforço é aceito na comunidade científica. Atualmente, as pesquisas são desenvolvidas para aperfeiçoar o uso das fibras, testando novos materiais para avaliar seu uso como reforço, desempenhando, além dos requisitos de resistência, condições que assegurem a proteção ao meio ambiente.

2.2.3. Tipos de fibras empregadas como reforço

As fibras podem ser classificadas em metálicas, minerais, poliméricas e naturais. As três primeiras são referidas com a finalidade de conhecer os tipos existentes no mercado, antes de se descrever as fibras orgânicas que constituirão a matéria do presente estudo. Os tipos de fibra serão apresentados brevemente a seguir.

2.2.3.1. Fibras metálicas

As fibras metálicas são utilizadas, geralmente, como método de melhoria das propriedades mecânicas dos materiais de construção. As mais empregadas são as fibras de aço.

A ruptura do compósito é, normalmente, associada ao arrancamento da fibra e não à sua ruptura. A resistência à tração da fibra é da ordem de 1100 MPa e o módulo de elasticidade é de 200 GPa.

Uma das desvantagens é que podem apresentar as fibras metálicas problemas de corrosão quando não possuem um recobrimento de níquel (Taylor, 1994).

2.2.3.2. Fibras minerais

Uma das principais características das fibras minerais é sua ótima aderência à matriz. Por exemplo, as fibras de amianto têm uma resistência à tração em torno de 1000 MPa e módulo de elasticidade de 160 GPa e apresentam uma ótima aderência a uma matriz composta por cimento, mas tem a desvantagem de possuir partículas que, quando liberadas, podem afetar o sistema respiratório humano.

As fibras de carbono também têm grande aderência entre a matriz e as fibras, devido à alta resistência das ligações entre os átomos de carbono, atingindo um módulo de elasticidade em torno de 420 GPa (Taylor, 1994).

As fibras de vidro são manufaturadas, normalmente, como centenas de filamentos justapostos, os quais têm grande aderência, mas possuem a desvantagem de serem muito susceptíveis ao ataque dos álcalis.

A tabela 2.1, apresenta as principais propriedades físicas dos três tipos de fibras:

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

Fibra	Densidade (kg/dm³)	Alongamento na ruptura (%)	Resistência à tração (GPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
Carbono	1,70 – 1,90	0,30 – 1,80	5,50	290 – 400
Vidro	2,50	5,00	1,50 – 4,50	87
Asbesto	2,50	0,62	1,00	160

2.2.3.3. Fibras poliméricas

Como as estruturas químicas das fibras poliméricas são manipuladas, podem-se obter os comportamentos desejados em relação à interação matriz-fibra. Portanto, o tipo de fibras poliméricas são as que podem trazer mais benefícios para o reforço dos solos, pois podem gerar uma fibra quimicamente neutra, não degradável, com ótimas propriedades físicas e mecânicas, que não seja prejudicial à saúde humana.

Existem diferentes formatos na apresentação de fibras; o reforço do solo pode ser feito desde fibras individuais até fibras tecidas, geralmente, em forma de malha, com a finalidade de proporcionar intertravamento das partículas do solo (Mcgown et al., 1978; Morel & Gourc, 1997).

As fibras poliméricas podem ser divididas em fibras de polipropileno, de polietileno, de poliéster e fibras de poliamida, descritas a seguir (Casagrande, 2005):

- (1) *Fibras de Polipropileno*: as fibras de polipropileno são compostas 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, apartadas 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;
- (2) *Fibras de Polietileno*: as fibras de polietileno têm um módulo de elasticidade baixo, são fracamente aderidas à matriz cimentícia 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;
- (3) *Fibras de Poliéster*: o poliéster apresenta 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 mais conhecido atualmente 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 são reciclados;

- (4) *Fibras de Aramida (Kevlar)*: 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 estendidas e reforçadas durante o processo de manufatura, altas resistências e módulos de elasticidade podem ser alcançados, como é o caso da Aramida (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 2.2, com as principais propriedades físicas dos quatro tipos de fibras:

Tabela 2.2 - Propriedades das fibras poliméricas

Fibra	Resistencia à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Aramida	3500	128
Polipropileno	400	8
Polietileno	24	1,1
Poliéster (PET)	130 - 880	4 – 15

2.2.3.4. Fibras vegetais

As fibras vegetais 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). Na tabela 2.3 apresenta-se uma classificação mais detalhada dessas fibras.

Tabela 2.3 - Principais fontes de fibras vegetais (Young, 1994)

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

Os primeiros tipos de fibras a serem empregados na história da humanidade foram vegetais. 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 mostra a tabela 2.4, por exemplo, as fibras do curauá que atingem, aproximadamente, resistências à tração acima de 700 MPa, com módulo de elasticidade entre 26 e 46 GPa.

O principal problema das fibras vegetais é sua durabilidade, pois podem ser degradadas por fungos e micro-organismos. Segundo Teodoro (1999), a exposição das fibras vegetais em ambientes alcalinos causa uma rápida degradação das fibras, como ocorre, por exemplo, no emprego das fibras vegetais como reforço de materiais com cimento Portland comum.

Apresenta-se a tabela 2.4, com as principais propriedades físicas de diferentes tipos de fibras vegetais.

Tabela 2.4 - Propriedades físicas e mecânicas das fibras vegetais (Bledzki e Gassan, 1999; Motta, 2006; Levy Neto e Pardini, 2006; Satyanarayan et al., 1982; Spinacé et al., 2009)

Fibra	Massa específica (g/cm ³)	Deformação máxima (%)	Resistencia à tração (MPa)	Módulo de Young (GPa)
Coco	1,18 – 1,29	30,0	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 - 1100	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

2.3. Fibras vegetais empregadas como reforço

Os compósitos reforçados com fibras são uma das técnicas atualmente utilizadas para a recuperação e reforço estrutural. Com a adição das fibras, é possível aperfeiçoar as propriedades mecânicas dos solos, como a resistência, flexão, tração, impacto e inibição de fissuras. Na maioria dos casos, o maior benefício obtido por reforçar matrizes frágeis com fibras é a melhoria do

comportamento após fissuração da matriz. Portanto, o compósito não rompe no início ou depois do início da fissuração: apresenta uma deformação plástica considerável que faz dele um material interessante para a construção.

A questão econômica também é importante e, segundo Levy Neto e Pardini (2006), o elevado custo dos reforços poliméricos, como as fibras de carbono e vidro, de U\$20,00 a U\$154,00 (preço/kg) e U\$1,40 a U\$17,50 (preço/kg), respectivamente, tem estimulado pesquisas para viabilizar o uso de fibras vegetais, que, além de apresentarem baixo custo em relação às fibras poliméricas, são recursos renováveis e abundantes, com apropriadas propriedades de resistência mecânica.

No Brasil, segundo a Distribuidora de produtos técnicos para a construção civil (DIPROTEC) a fibra de polipropileno é vendida em pacotes de 600 gramas e o pacote custa em torno de 15,50 reais (Guimarães, 2010).

O desenvolvimento de uma tecnologia ecológica tem sido uma necessidade para a proteção ambiental. Nesse sentido, procuram-se novos materiais que sejam ecologicamente mais adequados. O Brasil destaca-se como um país com grande potencial de liderança da tecnologia de fabricação de compósitos reforçados com fibras vegetais, já que possui a maior biomassa e extensão territorial cultivável do mundo, sendo um dos maiores produtores mundiais de várias fibras vegetais (Soares, 2012).

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 da fibra do coco são feitas no âmbito da construção civil, 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, segundo a parcela de contribuição da matriz do solo e da fibra a ser empregada.

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

- baixa massa específica.
- maciez e abrasividade reduzida.
- baixo custo.
- reciclável, não é tóxica 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.).

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).

No caso do uso da fibra de coco, por ela ser um material 100% orgânico, os problemas de degradação são inerentes ao material, devido às reações químicas em presença da água e oxigênio.

O presente estudo possuirá um enfoque na atitude da fibra de coco como material para reforço do solo e deixará aberta a possibilidade de futuras pesquisas em procura da impermeabilização da fibra para prevenir a degradação do material.

2.4. Estudos experimentais com fibra de coco

As fibras de coco são conseguidas do rejeito da fruta, da casca que é o revestimento fibroso exterior ao coco amadurecido. As fibras são constituídas, principalmente, de celulose, hemicelulose, lignina, pectina e outras substâncias solúveis em água, além de ceras. Apresenta-se na tabela 2.5 a composição de diferentes fibras vegetais comparadas com a fibra de coco.

Tabela 2.5 - Composição das fibras vegetais (Bledzki e Gassan, 1999)

Fibra	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)	Pectina (%)	Cinza (%)	Água (%)
Coco	36 – 43	0,15 – 0,25	20 - 45	3,0	2,7 – 10,2	10
Algodão	82,7	5,7	-	5,7	N.A.	0
Juta	64,4	12,0	11,8	0,2	N.A.	0
Linho	64,1	16,7	2,0	1,8	N.A.	0
Rami	68,6	13,1	13,1	0,6	N.A.	0
Sisal	65,8	12,0	12,0	9,9	N.A.	0

NA: Não avaliado

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.

Os trabalhos publicados em referência a ensaios, para definir as propriedades físicas e mecânicas da fibra de coco, têm uma grande dispersão nos dados obtidos, demonstrando a variabilidade dos resultados experimentais. Além disso, em alguns trabalhos, há coincidência de valores de pesquisas anteriores. A tabela 2.6, apresenta as principais características das fibras de coco.

Tabela 2.6 - Propriedades da fibra de coco (Costa, 2006)

Fonte dos dados	Resistência última à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação na ruptura (%)	Diâmetro (mm)	Comprim. (mm)	Densidade (Kg/m ³)
Kulkarni et al. (1981)	106 - 175	3 - 6	17 - 47	0,10-0,45	-	-
CEPED (1982)	182,2	3,4	28,27	0,7 (1)	-	1076,5 (1)
Ramaswamy et al. (1983)	140	-	26,25	0,20 - 0,25	125 - 300	-
Paramasivam et al. (1984)	69,3	2,0	-	0,3	-	-
Guimarães (1984)	180 CV=13 % (2)	2,8 CV=25% (2)	29,2 CV=12% (2)	-	-	-
Ghavami e Veloso (1985)	37,53 - 110,52	-	5,47 - 27,77	0,240 - 0,422	90 - 168	-
Aziz et al. (1987)	120 - 200	0,019 - 0,026	10 - 25	0,1 - 0,4	50 - 350	1120 - 1220
Satanarayana et al. (1990)	106 - 175	4,0 - 6,0	17 - 47	0,10 - 0,45	-	1150
Aggarwal (1992)	100 - 130	0,019 - 0,026	10 - 26	0,1 - 0,4	-	-
Tolêdo Filho (1997)	174 CV=24,2% (2)	3,5 CV=27% (2)	25 CV=29,1% (2)	0,25 CV=27,3% (2)	-	800 CV=7,6%
Savastano e Agopyan (1998)	95 - 118	2,8	23,9 - 51,4	-	-	1177

(1) Mathews (1936)

(2) Coeficiente de variação

Sobre a tabela 2.6, conclui-se que a fibra de coco possui baixo módulo de elasticidade e as matrizes frágeis, reforçadas com fibras dessas características, em que o arrancamento da fibra predomina sobre a ruptura, têm a aderência fibra-matriz como principal fator de influência sobre a tenacidade, que é a quantidade de energia que um material pode absorver antes de fraturar (Agopyan et al., 2003).

É importante considerar que as fibras vegetais têm composição química diferente, dependendo do tipo de planta de que provêm, da dimensão da célula cristalina, do ângulo helicoidal que a celulose faz em relação ao eixo central, dos defeitos superficiais, da estrutura da macrofibra vegetal, das propriedades físicas e mecânicas das fibras e da interação que a fibra pode fazer com a matriz do compósito (Faruk et al., 2012).

A fibra natural é composta de várias células que são formadas por microfibrilas cristalinas constituídas de celulose que, por sua vez, são conectadas por meio de uma camada amorfa formada de lignina e hemicelulose. Estas células diferem-se em suas composições químicas e em seu ângulo helicoidal das microfibrilas (Tomczak, 2010). Este conjunto de parâmetros determina as propriedades mecânicas das fibras.

Como é mostrado na tabela 2.7, o ângulo helicoidal da fibra de coco é um dos maiores das fibras orgânicas, normalmente um alto teor de celulose e um baixo ângulo helicoidal produzem uma fratura da fibra antes de atingir uma elongação de 4%.

Tabela 2.7 - Ângulos helicoidais de algumas fibras (Bledzki, 1999; Gassan, 2001)

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

A finalidade de utilizar esse tipo de fibras para reforçar as matrizes do solo está mais vinculada ao aumento da resistência ao impacto, flexão e tração, retardando, portanto, a aparição de fissuras e diminuindo a abertura de tais fissuras. Logo, um compósito com fibras tem uma maior capacidade de absorção de energia antes da ruptura (Silva et al., 2008).

O efeito de adesão entre matriz e fibra de coco é gerado pela rugosidade superficial da fibra, especificamente das saliências arrançadas como fileiras de pequenos nódulos. Essas saliências ajudam melhorar a aderência fibra-matriz, causando melhor resistência mecânica do compósito (Monteiro et al., 2006).

Fibras curtas sofrem maior fragilização que fibras longas pela existência de maior número de extremidades e maior área superficial entre a fibra e a matriz.

As fibras de coco em comparação de outros tipos de fibras têm melhores características microestruturais, como a durabilidade em meio alcalino (Savastano Jr. e Agopyan, 1998).

Após 28 dias de imersão da fibra de coco em um meio alcalino, Ramaswamy et al. (1983) notaram uma perda de resistência à tração menor para as fibras de coco – 5% de perda – do que para as fibras de juta – 32% de perda.

Toledo Filho et al. (2000) para estudar a sensibilidade das fibras de coco e sisal à alcalinidade numa matriz de argamassa de cimento, submeteu as fibras em imersão a uma solução de hidróxido de cálcio, durante 300 dias. Após esses 300 dias, as fibras perderam total flexibilidade.

Mesmo as fibras de coco e sisal foram imersas em água e, após de 420 dias, tiveram uma perda de resistência de 77,2% e 83,3%, respectivamente, comparadas com as resistências iniciais, possivelmente pela degradação microbiológica. Após seis meses de exposição ao ar, com ciclos de molhamento e secagem, as fibras diminuíram sua tenacidade.

Sobre a interação com o concreto, Al-Oraimi & Seibi (1995) afirmaram que o uso de uma baixa porcentagem de fibras de coco melhorou as propriedades mecânicas e a resistência ao impacto do concreto. Além disso, o concreto também obteve desempenho semelhante quando comparado ao concreto com adição de fibra sintética.

Toledo Filho et al. (1997) verificaram que o reforço de compósitos cimentícios com fibras de coco conduz a um aumento na relação de resistência à fissuração e de resistência à compressão da argamassa. Segundo os autores, esses resultados mostraram alguma similaridade com o efeito de inclusão de agregados graúdos no concreto ou com o aumento na quantidade de areia na argamassa.

Reis (2006) provou que a fibra de coco é um eficiente reforço para concreto polimérico, já que aumenta sua tenacidade e resistência à flexão. Gunasekaran et al. (2011) verificaram, por diferentes ensaios, que a inclusão da casca de coco no concreto cumpre os requisitos necessários para seu emprego como agregado leve. Quanto à condutibilidade térmica, Rodríguez et al. (2011) comprovaram que a intensidade da onda de calor, através do concreto, é significativamente reduzida com a utilização de fibra de coco como uma barreira térmica.

Bolaños (2013) realizou ensaios triaxiais em amostras de solo argiloso reforçado e não reforçado com fibras de coco, as fibras foram inseridas ao solo

moídas e cortadas (no comprimento aproximado de 2cm). Os ensaios foram realizados em amostras compactadas na densidade máxima e umidade ótima, com teores de fibra moída de 0,5% e 1% e teores de fibra cortada de 0,5%, 0,75%, 1%, 1,25% e 1,5%, em relação ao peso seco do solo. O autor comprovou um incremento na resistência ao cisalhamento das misturas solo-fibra, uma vez que se observa um discreto aumento do ângulo de atrito e em um expressivo aumento da coesão das misturas reforçadas, em comparação aos dados obtidos para o solo puro.

2.5. Mecanismos de interação solo-fibra

A interação entre o solo e a fibra depende de diversos fatores que têm sido estudados por diferentes autores que avaliaram o comportamento dos solos, com e sem reforço, segundo as variações dos parâmetros de resistência e deformabilidade. Em tal sentido, na presente revisão, apresentaremos os resultados de pesquisas que visavam encontrar os principais mecanismos que governam o comportamento dos materiais reforçados, experimentando, para isso, diferentes tipos de fibra.

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 do 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 com comprimento baixo 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 2.2 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.

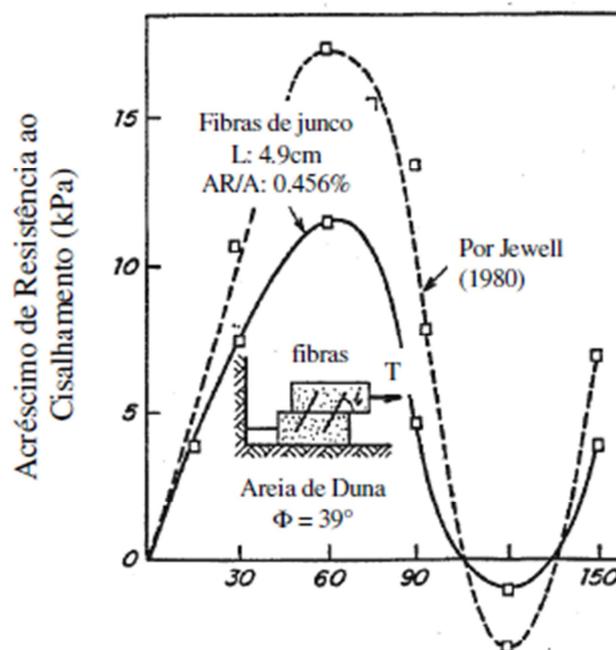


Figura 2.2 - Acréscimo de resistência em função da inclinação da fibra (Gray e Ohashi, 1983)

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 que o aumento da relação comprimento/diâmetro (l/d) da fibra torna mais efetiva a contribuição da fibra no aumento da resistência ao cisalhamento até certo limite.

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 uma argila acrescida 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. 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.

Nataraj et al. (1996) apresentaram os resultados de uma série de ensaios de laboratório em solo arenoso e em outro 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 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 cimentado 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 – 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 a 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 tensão confinante.

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.

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.

2.6. Prova de placa de carga em placa

2.6.1. Considerações iniciais

Os ensaios de prova de carga em placa em verdadeira grandeza, foram idealizados para implementar (no laboratório ou em campo) um modelo real das condições locais do solo, considerando diferentes estados de carregamento. Tais ensaios permitem determinar o comportamento e as propriedades de deformação e de ruptura do solo. Baseiam-se na colocação de uma placa sobre o solo, aplicando uma série de carregamentos para medir os recalques. O resultado do ensaio é apresentado como um diagrama carga-recalque.

Esse tipo de ensaio é bastante produtivo para pesquisar o comportamento de um solo sob diferentes condições de densidade, teor de umidade, teor de fibras como ocorre no presente estudo.

2.6.2. Estudos experimentais

Segundo Terzaghi & Peck (1967), geralmente, o bulbo de pressões gerado pelo ensaio de placa de carga é representativo das características do solo até dois diâmetros abaixo da placa. Por esse motivo, os resultados da prova de carga não podem ser extrapolados para elementos estruturais de maiores diâmetros, porque a distribuição de esforços é diferente nas camadas do solo, sobretudo quando o solo possui muita variação entre camadas.

Marsland & Eason (1973) analisaram a argila de Londres por meio de provas de carga *in situ* e concluíram que, para uma relação entre o diâmetro do

buraco e o da placa de 1,5 a 2,0, a capacidade de carga era igual à conseguida na superfície.

Segundo Mitchell & Katti (1981), o aumento no uso dos ensaios de campo ocorre devido, especialmente, à agilidade e capacidade para determinar as propriedades de um solo que perderia a qualidade de seu estado natural se fosse retirada uma amostra para ser levada ao laboratório: há a eliminação destas dificuldades, como a simulação das condições *in situ*, junto com a pouca representatividade de uma pequena amostra, comparada ao volume do solo heterogêneo do local.

Minkov et al. (1981) apresentaram ensaios de placa de área de contato circular e quadrada, variando de 0,04 m² a 4,0 m², realizadas em solo argiloso e em outro solo siltoso, estabilizados com cimento. As tensões abaixo das placas foram medidas por meio de células de pressão e a conclusão a que se chegou foi que a camada estabilizada redistribuía as tensões e acrescentava capacidade de suporte. Os recalques advertidos foram amortizados cerca de 3 a 6 vezes, quando empregada uma camada cimentada de 1,5 m de espessura. Para a camada de 2 m de espessura de solo cimentado, houve uma diminuição de 5 a 11 vezes dos recalques.

Segundo Pells (1983), os ensaios de placa podem ser classificados de acordo com o material para experimentar, conforme a forma de execução do ensaio, a localização da placa e o tipo da placa, rígida ou flexível. Os deslocamentos podem ser medidos no centro da placa ou com extensômetros em qualquer ponto sobre a placa ou em pontos sobre a superfície do terreno fora da placa.

Mellios (1985) apresentou resultados de ensaios de placa de carga circular de 0,80m de diâmetro, realizados em um solo poroso. O autor concluiu que, segundo o estado de baixa compactação do solo, o processo de carregamento parece um processo de adensamento do solo do que a clássica ruptura por cisalhamento de superfícies geometricamente definidas. O comportamento é bastante similar ao do ensaio de adensamento, portanto, analogamente, considerou-se tal ensaio como tensão de ruptura à pressão de pré-adensamento.

Segundo Robertson (1986), o ensaio de placa também possui limitações, como, por exemplo, a trajetória de tensões que pode não ser controlada durante a execução do ensaio, sendo diferente daquela do problema real. As condições de

drenagem não podem ser controladas independentemente e não são consideradas futuras modificações possíveis nas condições do solo.

Cudmani (1994) realizou ensaios de placa em solo natural a diferentes profundidades e com diversos diâmetros de placa. Os resultados mostraram que (1) a dispersão dos resultados foi inversamente proporcional ao diâmetro da placa. A dispersão foi produzida pela heterogeneidade do solo e o posterior amolgamento durante a preparação do ensaio; (2) foi comprovado o efeito da profundidade, isto é: a mesma placa sob uma pressão apresentou recalques menores em maiores profundidades; (3) as curvas carga versus recalque não apresentaram uma carga de ruptura definida, sendo uma magnitude de carga constante em contínuas deformações, comportamento característico de rupturas por punção; (4) as deformações elásticas são de pequena magnitude, quando comparadas com as deformações plásticas; (5) a tensão de fluência causada por meio dos ensaios de placa coincide com a tensão de pré-adensamento medida no ensaio de compressão confinada; (6) a relação carga-recalque é praticamente linear até a tensão de fluência; (7) a previsão da capacidade de suporte pela teoria proposta por Terzaghi (1943), considerando a redução dos parâmetros resistentes, aponta para boas previsões dos valores experimentais; (8) mostrou-se adequada a previsão de recalques do solo estudado por meio de procedimentos empíricos, embasados em resultados de provas de carga.

Vendruscolo (1996) utilizou uma placa de 0,30m de diâmetro para fazer ensaios sobre camadas de solo residual compactado e de solo tratado com cimento, a um teor de 5% de cimento, ambas com 0,60 m de espessura. Os resultados dos ensaios de placa sobre camadas de solo melhorado comprovaram que existe um aumento expressivo da capacidade de suporte, além de uma redução apreciável dos recalques, quando comparadas ao comportamento carga versus recalque do solo natural. A análise do desempenho de fundações superficiais sobre solos estratificados, por meio de simulações numéricas, corroborou a eficiência na previsão do comportamento carga versus recalque dessas fundações.

Consoli et al. (1997) demonstraram a eficiência do método dos elementos finitos na previsão do comportamento carga versus recalque de fundações superficiais, assentes em camadas superficiais de solo compactado.

Sales (1998) observou, por meio de ensaios de placa, a influência de distintas espessuras da camada estabilizada sobre as curvas carga versus recalque.

Segundo o autor, pode ser feita uma normalização dos ensaios de placa quando os resultados são plotados na forma tensão versus recalque relativo para uma mesma relação entre a espessura da camada tratada e o tamanho da placa.

Tessari (1998) realizou provas de carga sobre cinza pesada de carvão, misturada com 5% de cimento em camadas compactadas de 0,15 e 0,30m de espessura. Os carregamentos foram aplicados em placas de 0,30; 0,60 e 0,90m de diâmetro, sendo comparados com resultados de provas de carga sem camada de cinza pesada-cimento. Observou-se que a camada compactada de cinza pesada-cimento apresentou um menor recalque e uma capacidade de suporte em comparação com as camadas não compactadas de solo natural. Além disso, quanto maior for a relação entre a espessura da camada tratada e o diâmetro da placa (H/D), maiores serão as diferenças de recalque e de capacidade de suporte, fato também corroborado por Vendruscolo (1996) e Sales (1998). A ruptura deu-se sob a forma de puncionamento, comprovado pelas trincas em torno da placa e pela medição dos recalques nas bordas da mesma.

Consoli et al. (1998) avaliaram a influência da espessura de camadas de solo-cimento e o efeito do tamanho do elemento de fundação no comportamento carga-recalque. Utilizaram-se dados de ensaios em placas circulares de 0,30 e 0,60m de diâmetro, assentes sobre camadas de solo-cimento de diferentes espessuras, fixadas de forma diferente para se obterem valores distintos da relação espessura da camada tratada/diâmetro da placa (H/D), correspondentes a 0, 0,5; 1,0 e 2,0. Independente do tamanho da placa e da espessura de camada tratada, em todos os ensaios foi determinado um mecanismo de ruptura por puncionamento. Os autores concluíram que o efeito do diâmetro da área carregada (D) e da espessura da camada superficial (H), no espaço que relaciona tensão normalizada versus recalque relativo – razão entre o recalque e o diâmetro da placa –, é desprezível para as relações H/D avaliadas. Foi proposto, então, um método numérico de interpretação baseado no processo de ajuste da curva experimental obtida em ensaios de placa, encontrando-se valores representativos do módulo de elasticidade e dos parâmetros de resistência da camada de solo-cimento, sendo possível estimar o comportamento de elementos de fundação de distintos diâmetros sobre camadas melhoradas de diversas espessuras.

Thomé (1999) estudou o comportamento de fundações superficiais apoiadas em sistema de dupla camada, quando a camada superior é cimentada. Foram

construídos aterros experimentais, utilizando misturas de resíduos industriais, como cinza pesada e cal de carbureto na estabilização de um solo residual de arenito, e, sobre esses aterros, foram executadas provas de placa de carga. O autor concluiu que o comportamento de fundações superficiais sobre solos cimentados é controlado pela relação de espessura da camada cimentada e do diâmetro da fundação. O ângulo de atrito e o módulo de elasticidade da camada cimentada não influenciaram os resultados de prova de carga. A ruptura da fundação é função de dois mecanismos progressivos, os quais são, por sua vez, função das tensões de tração, geradas na parte inferior da camada cimentada e das tensões cisalhantes existentes logo abaixo das bordas de fundação.

Casagrande (2001) estudou, por meio de ensaios de placa, a influência da adição de fibras numa camada superficial de solo compactado e observou que a camada compactada reforçada com fibras apresentou um comportamento mais rígido e mais resistente do que a camada compactada sem reforço. Segundo Casagrande et al. (2002), no solo compactado sem reforço, foi observada uma banda de cisalhamento vertical abaixo da borda da placa, fato não observado na camada de solo-fibra. Para Consoli et al. (2003), as fibras permitem uma redistribuição de tensões em uma área mais ampla, aumentando a capacidade de suporte.

Um método semiempírico de previsão do comportamento de fundações superficiais apoiadas sobre sistemas de dupla camada, sendo a superior cimentada, foi proposto por Thomé et al. (2002). Com este método, foi possível prever, com boa acuidade, a capacidade de carga e a curva carga versus recalque de fundações superficiais.

Vendruscolo (2003) estudou a influência de camadas compactadas de areia estabilizada com cimento e também da mistura areia-cimento reforçada com fibras de polipropileno, no comportamento carga-recalque de fundações superficiais. Ensaios de placas circulares de 0,30m de diâmetro foram realizados sobre camadas compactadas de 0,30m de espessura. Observou-se um aumento da capacidade de suporte, da resistência e da rigidez da camada de areia-cimento. Verificou-se, também, um comportamento frágil com relação ao modo de ruptura, e, depois de atingida a resistência de pico, a capacidade de carga caiu para, aproximadamente, o mesmo valor da capacidade de carga obtida no ensaio de placa para o solo residual. A inclusão de fibras na mistura de areia-cimento

manteve a capacidade de carga máxima, obtida anteriormente, praticamente inalterada, porém, notou-se um comportamento pós-pico notadamente mais dúctil. O mecanismo de ruptura observado no campo para o ensaio de placa relativo à camada de areia-cimento mostrou trincas de tração verticais, que se propagaram da base para o topo da camada, especialmente na borda da placa. Já o reforço com fibras de polipropileno, distribuídas aleatoriamente na mistura de areia-cimento, mudou completamente o comportamento do mecanismo de ruptura, ou seja, a ruptura ocorreu pela formação de faixas espessas de cisalhamento ao redor da borda da placa – *shear bands* –, permitindo que as tensões espalhassem-se por uma área maior na interface da camada subjacente.

Casagrande (2005) realizou ensaios de prova de carga em placa para pesquisar a contribuição de fibras de polipropileno na mobilização de resistência, para diferentes níveis de densidade de compactação. Os resultados mostraram que as camadas compactadas com maior densidade apresentaram características relacionadas ao mecanismo de ruptura generalizada e, para menores densidades, foi observada ruptura localizada, constituída por superfícies de deslizamento em forma de cunha, que se iniciaram junto às bordas da placa, com um levantamento expressivo do solo ao redor destas, depois de grandes deslocamentos. Foi verificado que a inclusão do reforço fibroso melhorou significativamente a resposta do solo e a variação da densidade relativa das camadas teve um forte efeito sobre a resistência do material reforçado com fibras, onde o ganho de resistência era mais visível quanto mais densa fosse a mistura. Segundo o autor, as fibras inibem a propagação de fissuras, distribuindo as tensões em uma área maior. Conseqüentemente, o acréscimo de resistência pela adição das fibras ao solo deve-se à inibição da formação e da propagação de possíveis bandas de cisalhamento.

Donato (2007) estudou a distribuição de tensões em um solo arenoso reforçado com fibras de polipropileno por meio de ensaios de prova de carga em placa circular, com medidas diretas de tensão, pelo uso de células de tensão total. Calibrações em laboratório foram realizadas para avaliar os fatores que afetam as medições de tensões em células de tensão total, inseridas no solo. O método dos elementos finitos foi, também, utilizado para simular, numericamente, a distribuição de tensões dentro de câmaras de calibração. Nos ensaios de placa, pode-se observar que o comportamento carga-recalque do solo arenoso é,

significativamente, influenciado pela adição de fibras, aumentando sua capacidade de suporte e alterando os mecanismos de ruptura. As medidas de tensões mostram uma mudança na distribuição de tensões com a inclusão do reforço.

Segundo Consoli et al. (2009), comprovou-se, com ensaios de placa, que a inclusão de fibras na areia causa uma mudança considerável no comportamento carga-recalque. Quando comparadas com as areias não reforçadas, as fibras fornecem, ao compósito, uma superior rigidez e resistência. O comportamento do mecanismo de ruptura também mudou com a adição de fibras. Para todas as densidades relativas utilizadas, a interação entre os grãos de areia e as fibras dependeu da densidade relativa do material. No caso da areia solta a média densa (DR=30% e 50%), a areia reforçada com fibra em uma zona fora da borda da placa é puxada para baixo com a placa, evitando a ruptura por punção. Para o caso de grande densidade (DR=90%), as fibras têm o efeito de reduzir o levantamento fora da borda da placa, mesmo para cargas superiores a 50% da carga aplicada para a ruptura, na areia não reforçada. Fora da área da placa, as fissuras radiais manifestam-se na areia não reforçada e desaparecem quando a areia é reforçada pela fibra, independentemente da densidade relativa.

Consoli et al. (2009) dizem também, que para maiores densidades, o efeito da inclusão de fibras é mais apreciável. Em todas as densidades relativas, a areia reforçada com fibra apresentou, nos ensaios, maior rigidez global e maior capacidade de carga. No entanto, o valor de recalque, antes do início do ensaio da curva carga-recalque para areia não reforçada e reforçada com fibra, começa a divergir, dependendo, essencialmente, da densidade relativa, 50 mm para DR=30%, 30 mm para DR=50%, e quase zero para DR=90%. O efeito da inclusão de fibras em capacidade de carga e rigidez e a sensibilidade dos efeitos da densidade relativa parecem encaixar-se com a ideia de que a fibra tem o efeito que tende a suprimir a expansão.

A areia reforçada com fibra revela a capacidade de conservar a resistência – ou até mesmo continuar a aumentar a resistência – à deformação permanente, sugerindo um material muito dúctil. Assim, este material pode ser potencialmente utilizado em outros trabalhos de solo, como terraplenagem, parte da cobertura de *liners* de aterros de resíduos sólidos urbanos, que sofrem enorme diferencial de recalque, bem como em taludes mais suaves de solos orgânicos que sofrem com a excessiva deformação devido à consolidação. Em ambos os casos, este novo geo-

material poderá sofrer grandes deslocamentos diferenciais sem abrir fissuras ou deterioração (Consoli et al., 2009).

Girardello (2010) realizou ensaios de placa de carga comparando areia sem reforço e reforçada com fibras sintéticas com a finalidade de investigar a contribuição das fibras de polipropileno no mecanismo de ruptura. A areia foi analisada para uma densidade relativa de 50% e 90%. Após os ensaios, realizou-se a exumação das camadas para analisar o mecanismo de ruptura e se observou que, para o ensaio sem adição de fibras, ocorreu uma ruptura localizada, fissuras perpendiculares que iniciadas nos bordos da placa, enquanto que, na areia reforçada, as fissuras eram paralelas ao bordo da placa, devido à distribuição de tensões, produto da adição das fibras, mesmo mecanismo encontrado por Donato (2007).

Na revisão bibliográfica, foi observado que a literatura disponível apresenta pesquisas utilizando diferentes tipos de fibras, mas os conceitos teóricos e os trabalhos experimentais são importantes para entender os mecanismos de ruptura que acontecem nos solos com reforço.

No desenvolvimento desta pesquisa, foi comprovado que além de que as fibras de coco são orgânicas, a forma de como elas trabalham tem similaridade quando comparadas com as fibras sintéticas. Sendo assim, muitas das referências citadas no presente capítulo formaram a base das conclusões às quais chegamos no presente trabalho.