

2

Revisão Bibliográfica

2.1

Considerações Iniciais

No decorrer deste Capítulo é apresentada uma sucinta revisão da literatura sobre a técnica do reforço de solos com fibras, suas definições e propriedades gerais. Um breve histórico dos primeiros trabalhos documentados sobre a utilização de fibras em solos é relatado e em seguida é 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 e as alterações do comportamento dos solos causadas pela adição de fibras também são abordados. Finalmente são apresentados estudos experimentais e generalidades sobre ensaios triaxiais de extensão.

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.

2.2

Solos Reforçados

2.2.1

Histórico, Melhoria, Estabilização e Reforço de Solos

O conceito de melhorar as características mecânicas dos solos através da inserção de elementos resistentes à tração não é recente, ao contrário, data de eras antes de Cristo, quando materiais vegetais eram usados para dar maior resistência a tijolos de argila. Indícios do emprego desta técnica também são encontrados em partes da Grande Muralha da China e em estradas construídas pelos Incas, no Peru, empregando lã de lhama como reforço (PALMEIRA, 1992). Há vestígios também da utilização de palha em tijolos de argila, citados no Êxodo (ILLSTON, 1994).

Talvez uma das aplicações pioneiras que mais se aproxima de um geossintético dos dias atuais foi a utilização de mantas de algodão, em 1926, pelo Departamento de Estradas da Carolina do Sul, EUA, como reforço de camadas asfálticas em pavimentos (PALMEIRA, 1992). Este conceito foi resgatado no início da segunda metade do século XX, com a utilização de tiras de aço interagindo com solos em obras de contenção.

Entretanto, a técnica do reforço de solos com fibras, nos moldes que se tem hoje, passou a ser investigada há pouco mais de três décadas. A técnica inicialmente desenvolvida enfocava o reforço de solos através de inclusões aleatoriamente distribuídas dentro de uma massa de solo, onde se procurava avaliar o efeito de raízes de plantas na resistência ao cisalhamento dos solos, KAUL (1965) e ENDO e TSURUTA (1969), citados por SCHAEFER et al. (1997), e WOODHOUSE e HANES (1967), citado por (GRAY e OHASHI (1983). Trabalhos posteriores, MANBEIAN (1972), WALDRON (1977) e WALDRON e DAKESSIAN (1982), citados por SCHAEFER et al. (1997), confirmaram a contribuição das raízes de plantas à resistência ao cisalhamento do solo, contribuindo para a estabilidade dos taludes.

Atualmente, reforços em forma de tiras de aço, telas metálicas e vários tipos de materiais sintéticos têm sido amplamente utilizados na construção de obras geotécnicas. Tais aplicações vão desde as estruturas convencionais à estabilização de aterros sobre solos moles, passando por reforços de taludes, aumento da capacidade de suporte de fundações e reforço de pavimentos. Obras executadas a partir de solos reforçados, apresentam inúmeras vantagens técnicas, construtivas e econômicas, quando comparadas aos métodos tradicionais, contribuindo, desta forma, para o grande aumento de sua utilização em diversos tipos de obra.

A técnica de reforçar solos com fibras encontra-se inserida na tecnologia dos materiais compósitos, a qual vem despertando um interesse cada vez maior no meio científico. Prova disso se encontra em alguns dos livros mais recentes de engenharia dos materiais, onde os materiais compósitos fibrosos são abordados em capítulos específicos (TAYLOR, 1994; HANNANT, 1994; HOLLAWAY, 1994; ILLSTON, 1994; JOHNSTON, 1994 e BUDINSKI, 1996).

Segundo BUDINSKI (1996), um material compósito é a combinação de dois ou mais materiais que possuem propriedades que os materiais componentes não possuem por si próprios. Portanto, estes são constituídos por uma “matriz” e por um elemento de “reforço”, sendo que ambos são desenvolvidos para otimizar (ou complementar) as

características inerentes de cada uma destas duas componentes. Dentro deste contexto, os materiais compósitos mais promissores, segundo BUDINSKI (1996), são combinações de polímeros e materiais cerâmicos.

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 (CASAGRANDE, 2005).

Segundo VAN IMPE (1989), os processos de estabilização podem ser classificados como temporários, permanentes e permanentes com adição de novos materiais. A estabilização temporária consiste naquela limitada a um curto espaço de tempo, geralmente o tempo de execução de uma certa fase da obra, como por exemplo, o congelamento de solos e o rebaixamento do nível freático por drenos ou eletro-osmose. A estabilização permanente sem adição consiste em processos de compactação e tratamento térmico, como a compactação superficial ou profunda. A estabilização permanente de solos com adição de novos materiais normalmente combina a compactação com adição de um novo material, como estabilização com cal e cimento, injeção de materiais estabilizantes, colunas de brita ou areia, pré-carregamento e uso de drenos verticais, reforços com tiras metálicas ou geossintéticos. Este processo de reforço de solo consiste em se introduzir no maciço, elementos que possuam resistência à tração elevada (fitas metálicas, mantas, geotêxteis, geogrelhas, malhas de aço, fibras, etc.).

A utilização de geossintéticos 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. Apesar do substancial crescimento do interesse em geossintéticos no país nos últimos anos, este ainda pode ser considerado tímido. Para PALMEIRA (1992) o desenvolvimento da pesquisa sobre geossintéticos tem contribuído para a utilização destes materiais na geotecnia.

PALMEIRA (1995) aborda os tipos de geossintéticos disponíveis, sendo estes classificados em geotêxteis (tecidos e não tecidos), geogrelhas, geomalhas, geomembranas, tiras, fibras, e geocompostos. Os geotêxteis são os mais tradicionalmente conhecidos, sendo compostos de fibras têxteis ordenadas ou dispostas aleatoriamente, e utilizados como elementos de reforço, separação, drenagem, filtração, e

proteção. As geogrelhas são grelhas plásticas utilizadas como elementos de reforço. As geomalhas são estruturas planas com elevado volume de vazios para utilização como meio drenante. As geomembranas constituem elementos de baixíssima permeabilidade para utilização como barreiras impermeáveis em obras de engenharia civil. Geocomposto foi um termo criado para denominar o material originado da combinação de dois ou mais geossintéticos. O fibrossolo 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, 2001).

2.2.2

Materiais Compósitos Reforçados com Fibras

Um grande número de novos materiais tem sido desenvolvido atualmente, geralmente baseado em materiais tradicionais, mas incorporando de alguma forma elementos de reforço. Para tanto é necessário que se conheçam as propriedades mecânicas, físicas e químicas dos materiais de constituição e como eles podem ser combinados.

MATTHEWS e RAWLINGS (1994) classificam os materiais compósitos em dois grandes grupos, os chamados materiais compósitos particulados e os fibrosos (Figura 2.1). Dentro deste material compósito o solo desempenha a função de uma matriz e os reforços são representados por elementos dispersos (material compósito particulado) ou por fibras disseminadas no mesmo (material compósito fibroso). No caso de materiais compósitos fibrosos, fatores como teor de fibras presentes, comprimento das fibras, características do solo, aderência entre matriz e reforço e orientação e distribuição das fibras na matriz, são determinantes para o desempenho do compósito. Neste trabalho serão enfatizados os materiais compósitos fibrosos, pois as fibras atuam controlando a abertura e o espaçamento entre as fissuras, distribuindo de forma mais uniforme as tensões dentro da matriz.

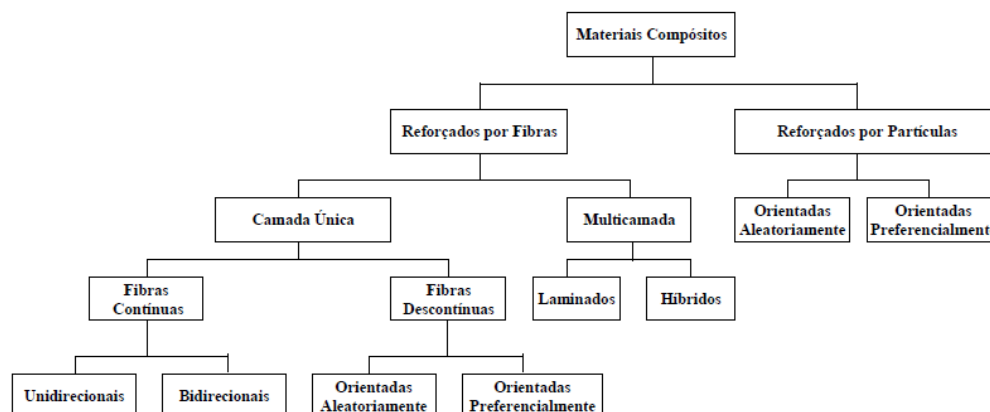


Figura 2.1 – Classificação de materiais compósitos (Matthews e Rawlings, 1994).

Para TAYLOR (1994), ILLSTON (1994) e HANNANT (1994) é consenso que o maior potencial dos materiais compósitos fibrosos está no estado pós-fissuração, onde as fibras contribuem de forma mais efetiva na resistência do material, aumentando assim a sua capacidade de absorção de energia. Isto se deve ao fato de que a deformação necessária para causar fissuras numa matriz cimentada é muito inferior à elongação das fibras, nas quais pouco ou nenhum aumento de tensão de fissuração é esperado. TAYLOR (1994) acredita que para haver um acréscimo de resistência pré-fissuração do compósito, é necessária a utilização de uma fibra mais rígida que a matriz, bem como a aderência do reforço com a matriz deve ser tal que impeça movimentos relativos entre as partes.

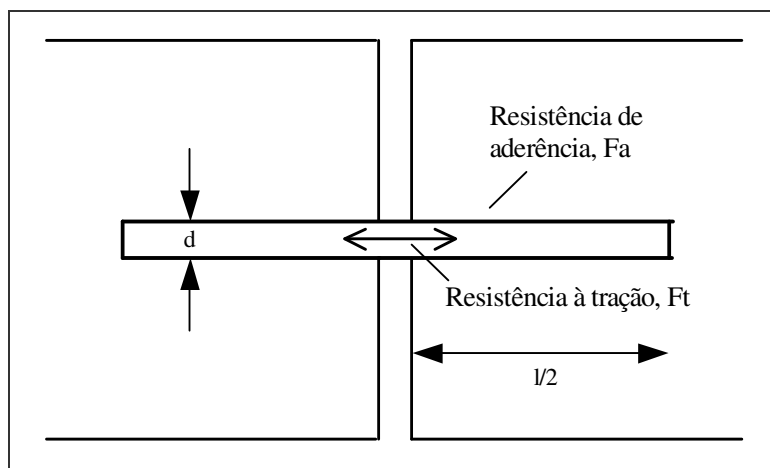
JOHNSTON (1994) define que a ação das fibras no compósito tende primeiro a reforçá-lo sobre todos os modos de carregamento que induzem tensões de tração (tração indireta, flexão e cisalhamento), melhorando, conseqüentemente, a ductilidade e a tenacidade da matriz com características frágeis.

As fibras não impedem a formação de fissuras no compósito, mas são capazes de aumentar a resistência à tração pelo controle da propagação das fissuras (TAYLOR, 1994). HANNANT (1994) acredita que as fibras mantêm as interfaces das fissuras juntas, beneficiando as propriedades mecânicas no estado pós-fissuração, ou seja, aumentando a ductilidade. As fibras que atravessam as fissuras contribuem para os aumentos da resistência, da deformação de ruptura e da tenacidade dos compósitos.

O desempenho dos compósitos reforçados com fibras é controlado principalmente pelo teor e pelo comprimento da fibra, pelas propriedades físicas da fibra e da matriz e pela aderência entre as duas fases (HANNANT, 1994). JOHNSTON (1994) acrescenta o

efeito da orientação e distribuição da fibra na matriz. A orientação de uma fibra relativa ao plano de ruptura, ou fissura, influencia fortemente a sua habilidade em transmitir cargas. Uma fibra que se posiciona paralela ao plano de ruptura não tem efeito, enquanto que uma perpendicular tem efeito máximo.

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



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

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

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

Segundo VENDRUSCOLO (2003), a cimentação, representada pela porcentagem de cimento, e a tensão de confinamento, exercem forte influência sobre as características de resistência e deformabilidade dos compósitos. Basicamente, a cimentação aumenta a resistência de ruptura, a rigidez inicial, a resistência última e a capacidade de absorção de energia de deformação. Além disso, quanto maior a tensão confinante, maior é a tendência do compósito ao comportamento dúctil.

O comportamento mecânico do material compósito reforçado é governado basicamente por duas fases bem distintas: uma etapa inicial de mobilização do conjunto

matriz-fibras em que predomina a ação da matriz e uma etapa final em que os mecanismos de interação são condicionados pela presença das fibras (COELHO, 2008).

Com respeito à influência dos principais parâmetros relacionados ao comportamento de solos reforçados, são apresentadas as conclusões obtidas por diversos pesquisadores. Alguns aspectos apresentaram resultados antagônicos, dependendo diretamente do tipo de fibra utilizada.

- **Teor de fibra:** quanto maior o teor de fibra, maior é o acréscimo de resistência mecânica, até um certo limite, a partir do qual este efeito não é mais observado (GRAY e OHASHI, 1983; GRAY e AL-REFEAI, 1986; Mc GOWN et al., 1988; MAHER e HO, 1994; ULBRICH, 1997; SPECHT, 2000; SANTONI et al., 2001; CASAGRANDE, 2001; VENDRUSCOLO, 2003; CONSOLI e CASAGRANDE, 2007); o aumento do teor de fibra provoca aumento do índice de fragilidade e da capacidade de absorção de energia de deformação (MAHER e HO, 1993); a inclusão de fibras diminui o índice de fragilidade e aumenta a capacidade de absorção de energia (GRAY e OHASHI, 1983; ULBRICH, 1997; MONTARDO et al., 2002).
- **Orientação das fibras:** os elementos de reforço devem estar posicionados na direção das deformações de tração do solo (Mc GROWN et al., 1978; MOREL e GOURC, 1997; FATANI et al., 1991; DIAMBRA 2010); fibras distribuídas aleatoriamente mantêm a resistência isotrópica, não sendo observados planos potenciais de fragilidade (GRAY e AL-REFEAI, 1986; GRAY e MAHER, 1989).
- **Módulo de elasticidade da fibra:** fibras com módulo de elasticidade baixo comportam-se como reforços idealmente extensíveis (GRAY e OHASHI, 1983; SPECHT, 2000); fibras com módulo baixo não contribuem para o aumento da resistência mecânica (MONTARDO, 1990; SPECHT, 2000); quanto maior o módulo maior a probabilidade de haver o arrancamento das fibras (SHEWBRIDGE e SITAR, 1990).
- **Aderência entre a fibra e a matriz:** as características de resistência, deformação e padrões de ruptura de uma grande variedade de compósitos reforçados com fibras dependem fundamentalmente da aderência fibra/matriz. Uma alta aderência entre a fibra e a matriz reduz o tamanho das fissuras e amplia sua distribuição pelo compósito (CASAGRANDE, 2005). As

fibras devem estar bem aderidas à matriz do compósito para que a sua resistência à tração seja mobilizada (TAYLOR, 1994).

- **Comprimento da fibra:** quanto maior for o comprimento das fibras, maior é o ganho de resistência mecânica, até um limite assintótico (GRAY e OHASHI, 1983; ULBRICH, 1997; SANTONI et al.; 2001; HEINECK, 2002; VENDRUSCOLO, 2003); além disso menor será a possibilidade delas serem arrancadas (CASAGRANDE, 2005); o aumento do comprimento da fibra provoca redução do índice de fragilidade, diminuição da resistência de pico (MAHER e HO, 1994); e aumento da capacidade de absorção de energia (CROCKFORD et al., 1993; ULBRICH, 1997; MONTARDO et al., 2002).
- **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 (CASAGRANDE, 2005).

2.2.3

Tipos de Fibras Empregadas como Reforço

No mercado atual existem diversos tipos de fibras, as quais podem ser empregadas no reforço de solos. As características de comportamento de cada uma delas, as propriedades físicas, químicas e mecânicas, que por sua vez irão afetar o comportamento do material compósito, estão intimamente relacionadas ao material do qual são compostas e ao seu processo de fabricação.

Portanto, a compreensão do mecanismo de interação matriz-reforço e da parcela de contribuição de cada uma das fases no comportamento do material compósito como um todo é fundamental para a definição do tipo de fibra a ser empregado. Esta definição dependerá fundamentalmente das características da matriz a ser reforçada e das características desejadas do material compósito resultante.

A seguir, são apresentados alguns tipos de fibras utilizados como elemento de reforço em materiais compósitos fibrosos. Para melhor entendimento do assunto, o tema

foi dividido segundo o material de origem da fibra: naturais ou vegetais, poliméricas, minerais e metálicas, abordadas individualmente.

2.2.3.1

Fibras naturais ou vegetais

As fibras naturais foram os primeiros tipos de fibras a serem utilizados pelo homem como material de construção. As principais fibras naturais como reforço de materiais de construção são as fibras de coco, bambu, algodão, sisal, piaçava, juta, malva e cana de açúcar (HANNANT, 1994).

BRAGA, M.A (2001) apresentou uma tabela com as principais propriedades físicas e mecânicas de algumas fibras naturais.

Tabela 2.1: Propriedades físicas e mecânicas das fibras naturais (Braga, 2001).

Fibra	Massa esp. Real (kg/dm³)	Absorção máxima (%)	Alongamento na Ruptura (%)	Resist. À tração (MPa)	Módulo elast. (MPa)
Sisal	1,37	110	4,9 a 5,4	347 a 378	15,2
Piaçava	1,05	34,4 a 108	6	143	5,6
Coco	1,18	93,8	23,9 a 51,4	95 a 118	2,8
Bambu	1,16	145	3,2	73 a 505	5,1 a 24,6

A avaliação da durabilidade dos compostos formados com fibras vegetais é o principal problema a ser investigado, pois podem ser degradadas pela ação de fungos e microorganismos. 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.

2.2.3.2

Fibras minerais

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

- **Fibras de Carbono:** baseada na resistência das ligações entre os átomos de carbono e na leveza dos mesmos. Possuem alta relação resistência/peso próprio, elevada rigidez, boas propriedades elétricas e estabilidade dimensional, além da resistência química e à corrosão elevada. As fibras de carbono apresentam alta resistência à tração e módulo de elasticidade em torno de 420 GPa. Tais características tornam imprescindível uma grande aderência entre a matriz e as fibras (TAYLOR, 1994).
- **Fibras de Vidro:** apresentam alta resistência mecânica e estabilidade dimensional, boas propriedades elétricas, alta resistência química e à corrosão, sendo resistentes ao ataque da maioria dos ácidos. Além disso, é um material não celular e de forma cilíndrica. Mantém as suas propriedades mesmo a uma temperatura de cerca de 340°C, perdendo apenas 50% de sua resistência à tração. Cerca de 99% das fibras de vidro são produzidas a partir do vidro tipo E, que é susceptível ao ataque dos álcalis.
- **Fibras de Amianto:** Também conhecidas como fibras de asbestos, apresentam resistência à tração em torno de 1000 MPa e módulo de elasticidade em torno de 160 GPa, 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.

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

Tabela 2.2: Propriedades físicas e mecânicas das fibras minerais (Curcio, 2001).

Fibra	Densidade (kg/dm³)	Alongamento na ruptura (%)	Resist. À tração (GPa)	Módulo elast. (GPa)
Carbono	1,70 a 1,90	0,3 a 1,8	5,50	290 a 400
Vidro	2,5	5	1,50 a 4,50	87
Asbesto	2,5	0,62	1,00	160

2.2.3.3

Fibras metálicas

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

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

2.2.3.4

Fibras poliméricas

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

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

- **Fibras de Polipropileno:** as fibras de polipropileno são termoplásticas, ou seja, adquirem uma consistência plástica com o aumento da temperatura. Essas fibras possuem uma grande flexibilidade e tenacidade em função de sua constituição; seu módulo de elasticidade gira em torno de 8 GPa (menor que qualquer outra fibra) e sua resistência à tração é de aproximadamente 400 MPa. Além disso, possuem elevada resistência ao ataque de várias substâncias químicas e aos álcalis (TAYLOR, 1994).
- **Fibras de Polietileno:** as fibras de polietileno têm um módulo de elasticidade baixo, são fracamente aderidas à matriz cimentada e altamente resistentes aos álcalis. Apresentam alta durabilidade e grandes deformações

de fluência, o que significa que, se elas forem utilizadas para suportar tensões altas permanentemente em um compósito fissurado, consideráveis elongações e deflexões podem ocorrer ao longo do tempo (HANNANT, 1994). Procurando minimizar o problema da baixa aderência e módulo, foi desenvolvido o polietileno de alta densidade. Segundo HEINECK (2002), o polietileno de alta densidade (PEAD), apresenta melhores características de aderência e mais alto módulo de elasticidade.

- **Fibras de Poliéster:** as fibras de poliéster apresentam alta densidade, rigidez e resistência, possuem um aspecto bastante similar às de polipropileno e podem ser utilizadas para as mesmas aplicações (TAYLOR, 1994). O polietileno tereftalato (PET) é o poliéster mais conhecido atualmente. É o material constituinte das garrafas plásticas. Apresenta alongamento na ruptura de 7% a 50% e densidade relativa entre 1,33 e 1,45. A temperatura de fusão é da ordem de 270°C (MANO, 1991).
- **Fibras de Poliamida (Kevlar):** As fibras poliméricas de alto módulo de elasticidade mais importantes, foram desenvolvidas de poliamidas aromáticas e são chamadas de fibras de aramida e conhecidas comercialmente por Kevlar. As fibras de aramida são derivadas de moléculas de polímeros com alto grau de aromaticidade (contendo anéis de benzeno) os quais exibem comportamento de líquido cristalino em solução. As moléculas agem como barras rígidas que se alinham paralelamente umas às outras para formar domínios ordenados. Quando soluções destas moléculas são sujeitas ao cisalhamento, os domínios ordenados tendem a se orientar na direção do esforço (HULL e CLYNE, 1996). As fibras de aramida são produzidas por extrusão e fiação. Quando a solução polimérica passa pelo processo de fiação desenvolve um alto grau de orientação e então podem alcançar valores de resistência e módulo de elasticidade elevados.

A Tabela 2.3 apresenta as principais propriedades físicas dos quatro tipos de fibras acima descritos.

Tabela 2.3: Propriedades mecânicas das fibras poliméricas (Mano, 1991; Hull e Clyne, 1996; Heineck, 2002)

Fibra	Resist. À tração (MPa)	Módulo elast. (GPa)
Aramida	3500	128
Polipropileno	400	8
Polietileno	24	1,1
Poliéster (PET)	130 a 880	4 e 15

2.2.4

Mecanismos de Interação Solo-Fibra – Estudos Experimentais

A grande maioria de estudos realizados em materiais compósitos tem a finalidade de comparar o comportamento de solos reforçados com o de solos não reforçados através dos respectivos parâmetros de resistência ou deformabilidade, analisando principalmente as consequências em detrimento das causas. Sendo assim, pretende-se focalizar e identificar as causas, ou seja, os mecanismos que regem o comportamento do material compósito, sem desprezar as consequências, pois elas nos permitem identificar quando ocorrem mudanças nos mecanismos.

Pode-se dizer que existe uma grande complexidade nos fatores que afetam o comportamento do compósito solo-fibra. São inúmeras as combinações de variáveis que alteram de forma significativa os mecanismos de interação. Para uma dada combinação de variáveis, o resultado obtido pode ser o desejado para uma dada aplicação do compósito, porém, pode não ser para outra. Conhecendo-se as mudanças na estrutura do material reforçado com fibras em relação ao solo não reforçado teremos base para avaliarmos até que ponto o comportamento mecânico dos solos reforçados pode ser explicado pelas mudanças nos parâmetros usuais empregados para solos não reforçados.

McGOWN et al. (1978) estudaram o efeito da inclusão de diferentes elementos de reforço em um solo arenoso nos estados denso e fofo. Os autores observaram que o comportamento tensão x deformação do solo reforçado depende fundamentalmente das características de resistência e deformabilidade dos elementos de reforço. Eles propuseram a divisão de reforço 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 de aumentar a ductilidade e diminuir a perda de resistência pós-pico, além do acréscimo de resistência mecânica. Já o elemento de reforço não-extensível tem deformação de ruptura menor que a máxima deformação de tração no solo sem reforço, confere ganho de resistência mecânica, porém, rupturas catastróficas podem ocorrer se o reforço romper.

GRAY e OHASHI (1983), propuseram um modelo teórico para prever o comportamento de uma areia reforçada com fibras. Os autores executaram ensaios de cisalhamento direto com areia, nos estados fofo e denso, reforçada com fibras naturais, sintéticas e metálicas. A partir dos resultados obtidos nos ensaios, eles chegaram à conclusão que a inclusão da fibra aumenta a resistência ao cisalhamento de pico e reduz a queda pós-pico. Também foi possível observar a existência de uma tensão de confinamento crítica onde, abaixo desta, as fibras são arrancadas e, acima desta, as fibras são alongadas. As fibras com módulo baixo comportaram-se como uma inclusão extensível, ou seja, não 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, este efeito não é mais observado.

A orientação das fibras com relação à superfície de cisalhamento também é considerada no modelo. Na Figura 2.3 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.

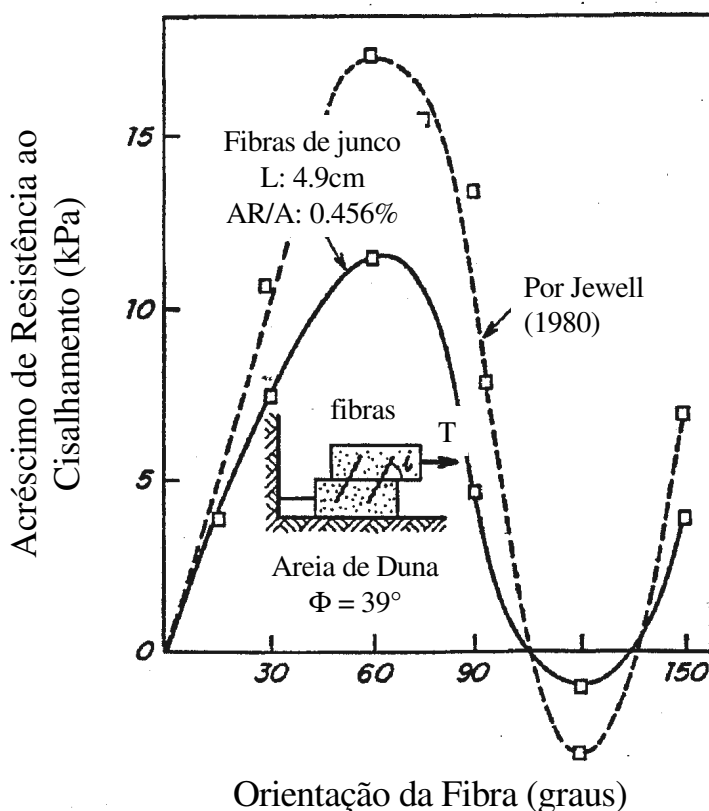


Figura 2.3 – Acréscimo de resistência em função da inclinação da fibra (Gray e Ohashi, 1983)

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 três fibras sintéticas diferentes: uma de nylon (descartada no início dos trabalhos por dificuldades de mistura), uma de polipropileno (com 0,20 mm de diâmetro) e outra também de polipropileno chamada Fibermesh (0,10 mm de diâmetro). As fibras mediam 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 x 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 da relação l/d resulta na redução desta tensão de confinamento crítica e torna mais efetiva a contribuição da fibra no aumento da resistência ao cisalhamento. Porém, o crescimento da resistência ao cisalhamento com o aumento do teor de fibra é observado 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, rigidez e 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 e forma das partículas) e da fibra (teor, relação l/d e módulo). A resistência diminui com o aumento do tamanho médio e da esfericidade das partículas de areia, por outro lado, há um acréscimo da resistência com o aumento do coeficiente de uniformidade da areia, do teor de fibras, do módulo das fibras e da relação l/d . 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, ainda há 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 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) através 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 pronunciado para 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 para o aumento da resistência. Porém, após a ruptura, as fibras mais curtas são arrancadas mais facilmente, 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 pronunciada para maiores teores de fibra.

NATARAJ et al. (1996) apresentaram os resultados de uma série de ensaios de laboratório em um solo arenoso e outro argiloso 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 pronunciado para maiores teores de fibras. Independentemente do solo estudado, foi observado 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) através 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. (2000 e 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 pronunciado na resistência de ruptura, ao passo que fibras relativamente flexíveis (fibras de polipropileno) exercem efeito mais pronunciado no modo de ruptura e no comportamento último; (2) a inclusão de fibras PET ou de vidro aumentou tanto a resistência à compressão, quanto a resistência à tração da matriz cimentada, enquanto que as fibras de polipropileno não

aumentou estas duas variáveis; (3) a inclusão de fibras de polipropileno no compósito cimentado alterou o comportamento do material na ruptura, que era frágil, para dúctil, sendo que a inclusão das fibras PET e de vidro não modificaram 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 semi-rígido foram dimensionadas onde se observou uma significativa redução na espessura da camada cimentada quando da utilização de reforços fibrosos em forma de filamentos.

FEUERHARMEL (2000) estudou o comportamento de três tipos de solo (uma argila, uma areia-siltosa e uma areia), artificialmente cimentadas (teor de 7% em relação ao peso de material seco) e não-cimentadas, reforçadas com fibras de polipropileno (teor de 0.5%) de dois comprimentos (12 e 36mm); a distribuição das fibras na massa de solo foi aleatória. O autor concluiu que: (1) a adição de fibras de polipropileno provocou reduções no módulo de deformação inicial do solo, sendo que a intensidade das alterações depende do tipo e das características de cada solo. Para misturas não-cimentadas, os solos menos rígidos foram os mais afetados enquanto que as alterações na areia foram pequenas; (2) quanto à resistência ao cisalhamento, o comportamento resistente dos solos não-cimentados reforçados pode ser dividido em três etapas, uma inicial, onde o comportamento é controlado basicamente pela matriz de solo, uma etapa intermediária, na qual o comportamento do material compósito é comandado juntamente pela matriz e pelos elementos de reforço, e uma etapa final, onde o comportamento do material é comandado exclusivamente pelas fibras; (3) para os solos não-cimentados, cujas deformações se distribuem por toda a amostra, as fibras constituem uma estrutura

entrelaçada que impõe uma resistência às deformações radiais na amostra, aumentando assim as deformações de compressão do solo. Este efeito depende da adesão entre o solo e as fibras, sendo que para a areia, onde esta adesão é inferior aos demais solos, não se observa alterações significativas na variação volumétrica; (4) para os solos cimentados, onde as deformações se concentram apenas na superfície de ruptura, as fibras atuam, em hipótese, de duas maneiras, (a) o efeito de ancoragem, proporcionado pelas fibras ancoradas nos dois lados da superfície de cisalhamento e que tende a reduzir a dilatação; (b) a redistribuição de esforços, que causa a expansão da superfície de cisalhamento, tendendo 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 através de ensaios triaxiais e a 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, onde o efeito da adição de fibras é mais evidente para maiores comprimentos e maiores teores de fibras, sendo seu efeito mais pronunciado para materiais compósitos com maiores densidades. O autor cita também que a influência das fibras na resistência de pico e

última do material depende do diâmetro das fibras e da distribuição granulométrica do solo.

CONSOLI et al. (2004) avaliou o comportamento de uma areia cimentada e não cimentada reforçada com fibras. As fibras de polipropileno reduziram drasticamente o índice de fragilidade da areia cimentada, mudando o modo de ruptura de frágil a 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 das mesmas para todos os níveis de tensão tanto no carregamento quanto no descarregamento, mantendo-se praticamente constantes no carregamento e crescendo no descarregamento.

CASAGRANDE (2005) estudou o comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno, submetidos a grandes deformações, que possuam 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, como também 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 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 pronunciado para misturas mais densas. O comportamento carga-recalque do solo arenoso foi significativamente influenciado pela adição de fibras, aumentando a capacidade de suporte deste e alterando mecanismos de ruptura.

FALORCA (2006), após a realização de ensaios de cisalhamento direto e ring shear, conclui que, o acréscimo do deslocamento de cisalhamento do solo reforçado, vai gerar um aumento da resistência ao cisalhamento deste, além de que existe uma forte relação entre o aumento da resistência ao corte dos solos e a dilatação: quando a dilatação diminui ou tende para zero, a resistência ao corte deixa de aumentar.

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

FESTUGATO (2008) analisou o comportamento mecânico de um solo (areia fina) micro-reforçado com fibras de polipropileno de distintos índices aspecto. 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 conclui que: (1) os micro-reforços proporcionam ao solo um comportamento de endurecimento (*hardening*), que passa a ser mais pronunciado a partir de um dado valor de índice aspecto das fibras (em torno de 300); (2) as fibras proporcionam ao solo a ampliação da

superfície de *Hvorslev*. Sendo assim, a região de estados limites do material é majorada com a adição dos micro-reforços.

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

CONSOLI e CASAGRANDE (2009), estudaram o efeito da densidade relativa da areia reforçada com fibras de polipropileno submetidas a ensaios de placa, concluindo que o efeito de inclusão das fibras pode ser mais pronunciado para densidades mais altas. O reforço da areia tem a capacidade de aumentar sua resistência. Porém este material compósito poderia ser utilizado em terraplenes como parte de revestimentos de aterros de resíduos, os quais podem sofrer maiores assentamentos diferenciais.

GIRARDELLO (2010) avaliou o comportamento mecânico de uma areia não saturada, com e sem reforço de fibras de polipropileno, através de ensaios de placa em densidade relativa de 50% e 90%; ensaios triaxiais e ensaios de sucção. O melhor resultado foi obtido para o ensaio de placa realizado na maior densidade relativa. Quanto aos ensaios de sucção, noto-se que a inclusão das fibras não ofereceu nenhuma influência na magnitude da resistência apresentada devido à sucção. Quanto aos ensaios de placa; a inclusão aleatória das fibras confere ao material uma melhora no comportamento carga-recalque, com influência na mudança dos mecanismos de ruptura. O comportamento carga-recalque não difere para o solo reforçado e sem reforço. Essa diferença é perceptível a partir do momento em que a mobilização das fibras que são inseridas na matriz arenosa começa a se mostrar mais efetivas, que ocorre somente após certo nível de recalque e carga aplicada.

LIRER (2012), estudou o comportamento de uma areia com pedregulho misturada com fibras de polipropileno chegando a concluir que a adição das fibras ao material oferece uma maior influencia ao material para baixas tensões confinantes. Para grandes

deformações o comportamento resistente do material com reforço e sem reforço é similar, isto quer dizer que a adição das fibras à areia com pedregulhos não contribui positivamente à resistência do material quando ele sofre grandes deformações.

2.2.5

Alterações nas Propriedades dos Solos pela Inclusão de Fibras

Na seqüência são descritas algumas alterações que ocorrem no solo devido à inclusão de fibras. Diversos autores já relataram em seus trabalhos algumas mudanças que ocorrem no comportamento mecânico dos solos reforçados com fibras. Estas mudanças são relacionadas à compactação, resistência, deformabilidade, modo de ruptura, variação volumétrica, rigidez inicial e condutividade hidráulica.

2.2.5.1

Compactação

HOARE (1979) estudou a influência da adição de fibras de polipropileno na compactação de um cascalho com areia. Observou que as fibras conferem uma certa resistência à compactação, resultando em porosidades maiores da mistura, para as mesmas energias de compactação, sendo este aumento linear em relação à quantidade de fibra e independente do tipo de compactação empregada. Resultados de ensaios empregando-se dois tipos de reforços diferentes sugeriram ainda que a influência na compactação é comandada pela interação entre solo e reforço, atentando para aspectos como a granulometria do solo, forma das partículas, textura e área superficial do reforço.

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

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

Vários outros autores relataram também não ter encontrado nenhuma alteração significativa com a inclusão de fibras (e.g. MAHER e HO, 1994; ULBRICH, 1997; CONSOLI et al, 1999; CASAGRANDE, 2001; HEINECK, 2002).

LEOCÁDIO (2005) observou um aumento significativo na densidade seca máxima de um solo laterítico quando reforçado com fibras de sisal tratadas superficialmente com EPS. Aumento no teor de umidade ótimo também foi observado quando se aumentou o teor das fibras, com redução deste aumento da umidade ótima com o tratamento superficial. O autor justifica que o tratamento com EPS reduz a absorção de umidade das fibras de sisal.

2.2.5.2

Resistência ao cisalhamento de pico

Segundo MAHER e 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 e KATTAK (1979) e por NATARAJ et al. (1996).

BUENO et al. (1996) realizou um estudo comparativo entre um material granular e um coesivo, observando 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 for a quantidade de fibras.

RANJAN e CHARAN (1996) observaram que a curva tensão x deformação de uma areia fina reforçada exibia tendências a crescimento mesmo a deformações axiais de ordem de 20%. TEODORO (1999) observou um aumento na resistência de uma areia siltosa reforçada com o aumento no comprimento das fibras de polipropileno de 0 para

30mm, comportamento este distinto do solo argiloso, que apresentou um máximo de resistência para fibras de 15mm.

O estudo realizado por MAHER e GRAY (1990), utilizando duas composições de bolas de vidro em lugar do solo, ambas com granulometria uniforme, porém diferentes diâmetros médios das partículas, 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.

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 e OHASHI, 1983; GRAY e AI-REFEAI, 1986), por outro lado, outros constataram um aumento não linear (SHEWBRIDGE e SITAR, 1989; JEWELL e WROTH, 1987; TEODORO, 1999).

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 e OHASHI, 1983; BUENO et al., 1996; NATARAJ et al., 1996; STAUFFER e 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. A bi-linearidade foi também observada por vários autores (GRAY e OHASHI, 1983; GRAY e AI REFEAI, 1986; MAHER e GRAY, 1990; STAUFFER e HOLTZ, 1996; MOREL e GOURC, 1997; KANIRAJ e HAVANAGI, 2001). Foi observado ainda que quanto menor for a rugosidade ou aderência da interface solo-fibra, maior é a tensão de confinamento crítica. Fibras mais rugosas tendem a ser mais efetivas no aumento da resistência.

MONTARDO (1999) e CONSOLI et al. (2002-b) constataram o aumento do ângulo de atrito de uma areia uniforme cimentada e não cimentada reforçada com vários tipos de fibra. 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. Não foi constatada pelos autores a existência de uma tensão de confinamento crítica para estes materiais.

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

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

Com relação a solos argilosos estabilizados com cimento e reforçados com fibras, OMINE et al. (1996) fizeram algumas considerações baseadas em ensaios de compressão não confinada. Eles afirmaram que a adição de fibras pode aumentar ou reduzir a resistência de pico, de acordo com a quantidade de cimento acrescida ao solo, ou em outras palavras, de acordo com a menor ou maior rigidez da matriz, respectivamente, sendo este efeito mais pronunciado com o aumento da quantidade de fibras. Os mesmos autores observaram também que quanto maior a esbeltez da fibra, isto é, quanto maior o fator de forma, maior é o acréscimo de resistência, fato este observado por CONSOLI et al. (1997-b) para um solo arenoso.

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 (e. g. BUENO et al., 1996; NATARAJ et al., 1996; TEODORO, 1999; HEINECK, 2002). Tal efeito não foi analisado por ANDERSLAND e 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).

Análises baseadas em ensaios triaxiais revelaram 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 e KATTAK (1979), Al WAHAB e El-KEDRAH (1995), TEODORO (1999) e HEINECK (2002).

2.2.5.3

Resistência ao cisalhamento pós-pico

Praticamente todos os trabalhos que analisaram o comportamento de solos reforçados em termos da resistência concluíram que a adição de fibras reduz a queda da resistência pós-pico (GRAY e OHASHI, 1983; GRAY e Al-REFEAI, 1986; FATANI et al., 1991; RANJAN et al., 1996; CONSOLI et al., 1997-b, 1999, 2002-b; DONATO et al., 2004, 2007; CASAGRANDE, 2005 e FESTUGATO, 2008).

2.2.5.4

Deformabilidade

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

McGOWN et al. (1988), para areias e MAHER e HO (1994) e NATARAJ et al. (1996), para argilas, relataram um aumento no módulo de deformação, tanto maior quanto maior o teor de fibras. Contrariamente, ULBRICH (1997) e CONSOLI et al. (1999) obtiveram redução do módulo com a inclusão de fibras, para areias cimentadas e não cimentadas.

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

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

Resultados de módulo de resiliência realizados por DONATO et al. (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. Os autores encontraram que quanto maior é o comprimento das fibras de reforço, maior é o incremento da resistência cisalhante do solo. Foi observado também que quanto maior é a deformação cisalhante no ensaio, maior vai ser a quantidade de fibras rompidas, isto confere a ideia de que as fibras se alongam até que as deformações do ensaio superam a deformação de ruptura das fibras, porém as fibras sofrem deformações plásticas antes de romper.

2.2.5.5

Modo de ruptura

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

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

SPECHT (2000) avaliou os efeitos da inclusão de fibras poliméricas de diferentes propriedades mecânicas (uma em forma de filamentos e outra fibrilada – tipo mesh) num solo artificialmente cimentado e observou que com a inclusão de fibras mais alongáveis (em forma de filamento) o comportamento do material, que era frágil, torna-se dúctil.

Sendo que para as fibras mais rígidas (tipo mesh) não se expressa uma modificação no modo de ruptura do material.

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

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

2.2.5.6

Variação volumétrica

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

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

2.2.5.7

Rigidez inicial

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

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

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

2.2.5.8

Condutividade hidráulica e outras propriedades

O aumento da condutividade hidráulica devido à adição de fibras em solos argilosos é relatado por vários autores. MAHER e HO (1994) observam um aumento na condutividade hidráulica para teores de fibra > 1% (polipropileno e vidro). Já AL WAHAB e EL-KEDRAH (1995) observam um aumento da condutividade hidráulica em mais de uma ordem de grandeza para 2% de fibra (polipropileno).

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

BUENO et al. (1996) relataram uma redução da permeabilidade de uma ordem de grandeza, causada pela adição de fibras a solos granulares.

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

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

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

2.2.6

Estudo Numérico

DIAMBRA (2010), apresenta um novo método de modelado para a predição do comportamento constitutivo dos solos reforçados com fibras sob condições triaxiais. O modelo baseia-se na regra das misturas de materiais compósitos e considera que as fibras e o solo têm um comportamento elástico e lineal. O modelo foi calibrado utilizando os resultados de um extenso programa experimental o qual compreende a realização de ensaios triaxiais de compressão e extensão. O modelo leva em conta a orientação das fibras dentro do corpo de prova, já que segundo o autor foi observado que nos ensaios triaxiais de extensão, quanto mais vertical as fibras se encontram dentro do corpo de prova, maior é a resistência atingida pelo material compósito.

FERREIRA (2010), realizou uma modelagem numérica do comportamento mecânico de solos reforçados com fibras de polipropileno, através de uma análise micro-mecânica, utilizando como ferramenta o Método dos Elementos Discretos (MED), o qual permite a representação do solo em 2D, a partir de um conjunto de partículas de elementos discretos circulares. Conseguindo identificar a real interação entre as partículas do solo e do reforço em forma de fibra, indicando que as fibras, quando inseridas no solo, podem sofrer deformações plásticas de tração e alongamento até atingir a ruptura, proporcionando a melhora nos parâmetros mecânicos do solo.

2.3

Ensaio Triaxial de Extensão

OLSON e KIEFER no ano 1963 encontraram que as diferenças entre os valores de c' e ϕ' nos ensaios de compressão e extensão devem-se, provavelmente, ao fato de que as correções a serem aplicadas aos ensaios de extensão podem ser maiores do que as correções correspondentes aos ensaios de compressão devido à maior mobilização da membrana e do papel filtro quando solicitados à extensão.

Segundo WESLEY (1975), a razão principal para as diferenças entre as resistências não drenadas, S_u , obtidas em ensaios de compressão e extensão está nas variações de pressões neutras induzidas no interior do corpo de prova pelos dois tipos de carregamentos, e pela maneira como estas influenciam as tensões efetivas no corpo de prova.

PESSOA,(1980) realizou ensaios triaxiais de compressão e extensão numa argila cinza de Botafogo, Rio de Janeiro. O autor observou que: (1) Os ensaios triaxiais de compressão e extensão apresentaram diferentes envoltórias de tensões. Acredita-se que este fato deva-se à maior influência da membrana e do papel filtro nos ensaios de extensão, além dos efeitos da anisotropia do material. (2) A resistência não drenada, S_u , obtida nos ensaios de compressão é superior à obtida nos ensaios de extensão. S_u (extensão) = $(0.80 \pm 0.10) S_u$ (compressão). Esta diferença deve-se provavelmente, à influência da anisotropia do solo e da tensão principal intermediária, σ_2 , diferente nos dois tipos de ensaios. (3) As inclinações do trecho inicial das curvas tensão-deformação obtidas dos ensaios de compressão são aproximadamente duas vezes superiores às inclinações das curvas referentes aos ensaios de extensão sob iguais pressões de adensamento. Este fato tem sido observado por diversos pesquisadores que o atribuem à influência da anisotropia do solo ensaiado, e da tensão principal intermediária.

LODI, (1998), avaliou a capacidade de representação do modelo elastoplástico Cam Clay Modificado, frente a ensaios de laboratório realizados com um solo arenoso da região de São Carlos. Foram realizados ensaios de compressão e extensão triaxial com a finalidade de comparar os resultados teóricos do modelo e os resultados experimentais obtidos. O autor conclui que: (1) Com a diminuição da tensão octaédrica, os resultados obtidos pelo modelo Cam Clay Modificado são muito próximos à realidade observada. O ajuste fornecido pelo modelo frente aos resultados práticos foi muito bom nos ensaios em que as tensões confinantes eram de 150 KPa e 200 KPa. (2) O modelo Cam Clay Modificado admite a condição de fluxo associado, no solo estudado isso não foi atendido, acredita-se que a principal razão esteja relacionada ao fato de estar-se trabalhando com

um solo natural (arenoso), de estrutura própria, que se afasta bastante dos solos ideais (argilosos) utilizados na formulação e validação dos modelos Cam Clay.

MOFIZ e RAHMAN, (2010) estudaram o comportamento da resistência ao corte de um solo expansível de alta plasticidade submetido a ensaios de extensão triaxial, com tensões confinantes entre 100 KPa e 500 KPa. A finalidade do estudo foi fazer uma comparação nos valores experimentais com os valores teóricos usando o modelo hiperbólico. Os resultados obtidos mostraram que as amostras romperam na ordem de 4% a 8% da deformação axial, dependendo da pressão de confinamento. Quanto à análise teórico empregando o modelo hiperbólico, apresenta uma boa concordância com os resultados experimentais.

CHENG-WEI CHEN, (2010) avaliou o comportamento de uma areia siltosa reforçada e não reforçada com fibras de polipropileno de 50 mm de comprimento, os resultados dos ensaios realizados na areia siltosa levaram à autor a concluir que o incremento na resistência ao cisalhamento gerado pela adição das fibras ao solo é muito menor num ensaio triaxial de extensão que o incremento obtido num ensaio triaxial de compressão.

(DIAMBRA et al. (2010), apresentou um novo método de modelamento para a predição do comportamento constitutivo dos solos reforçados com fibras em condições triaxiais. O modelo foi calibrado e testado utilizando os resultados de uma serie de ensaios triaxiais de compressão e extensão. Dos ensaios triaxiais eles encontraram que na compressão triaxial o aumento da resistência foi induzida pela presença das fibras, nos ensaios de extensão o benefício das fibras é muito limitado quanto à resistência. Os autores atribuem esse efeito à orientação das fibras dentro da mistura já que no método de moldagem dos corpos de prova (compactando em capas com a finalidade de manter a densidade desejada) a maioria das fibras encontram-se na orientadas na direção horizontal. DIAMBRA et al. (2007a) encontrou que o 97% das fibras tem uma orientação entre $\pm \pi/4$ com respeito ao plano horizontal. Dessa maneira, quando a mistura é solicitada a extensão, as fibras não oferecem um aumento da resistência do solo.