

1. Introdução

1.1. Problema, relevância e justificativa da pesquisa

Os solos, muitas vezes, não possuem os requisitos necessários para serem estáveis, portanto, deve-se escolher entre melhorar o solo existente com um material adicional (reforço) ou mudar o solo por um material novo que tenha características que assegurem a estabilidade do projeto a ser desenvolvido.

Diante dessas duas alternativas, na maioria dos casos, por uma questão de custo, é preferível escolher o melhoramento do solo existente, ao invés da mudança de material. Para isso, existem várias maneiras de se fazer a melhoria do solo, seja por meio de compactação, inserção de geossintéticos, adição de fibras, etc.

A inclusão de fibras para o melhoramento do solo é uma prática antiga (Vane Impe, 1989) onde o reforço de solo foi empregado como técnica há mais de três mil anos pelos babilônicos e chineses (Festugato, 2008).

Neste trabalho em particular, a melhoria dos solos é observada por meio da adição de fibras vegetais que são destinadas a inibir a propagação de fissuras que provocam a perda da capacidade de suporte do solo, causando um incremento da resistência pos-fissuração.

Mundialmente, a proposta ecológica de conservar e resguardar os recursos naturais é um estímulo ao desenvolvimento de novas classes de materiais. Neste cenário, aparecem os compósitos totalmente reciclados, reforçados com fibras vegetais. Os compósitos reforçados com fibras vegetais proporcionam propriedades de grande valor, como a melhoria da resistência mecânica e da leveza do solo.

As fibras vegetais, além de serem de fontes renováveis, possuem baixo custo quando comparadas com as fibras sintéticas. No caso das fibras de coco, que são rejeitos em países tropicais, seu aproveitamento gera vantagens também no que diz respeito à diminuição da quantidade de lixo sólido (Ishizaki et al, 2006).

O reforço do solo, feito a partir das fibras de coco, nasce como uma proposta de emprego para materiais reciclados, sendo tais fibras procedentes de resíduos de cocos gerados pelo consumo da água do coco verde, encontrada em grandes quantidades nas regiões costeiras.

A água de coco verde é um produto próspero no mercado brasileiro, com crescimento de mercado estimado em 20% ao ano de acordo com o sindicato nacional dos produtores de coco (SINDCOCO, 2014). O problema, segundo a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2012), localizada em Fortaleza/CE, é que as cascas, geradas por este agronegócio, representam de 80% a 85% do peso bruto do fruto e cerca de 70% de todo lixo gerado nas praias brasileiras, transformando-se em um sério problema ambiental, principalmente para as grandes cidades.

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), por meio do Levantamento sistemático da produção agrícola de 2010 (LSPA), a produção de coco, em toneladas, no Brasil, saltou de 1.300.000, no ano 2000, para quase 2.000.000 de toneladas em 2010, sem dados estatísticos até 2014.

Esta crescente quantidade de coco propicia o emprego das fibras para distintos fins. Dentre eles a inclusão destas por meio da adição em matrizes de solo vem sendo bastante estudada, pois sua aplicação pode melhorar as propriedades mecânicas dos compósitos finais.

O uso das fibras vegetais em materiais compósitos não é novidade, pois os países em desenvolvimento vêm gerando pesquisas, segundo a disponibilidade de fibras existentes nesses países. No Brasil, temos o Centro de Pesquisas e Desenvolvimento (CEPED), localizado em Camaçari, Bahia, como pioneiro no estudo sistemático de fibras, que iniciou seu trabalho em 1980, com a avaliação de fibras de sisal, coco, bambu, piaçava e bagaço de cana-de-açúcar para a produção destes compósitos.

O presente trabalho visa produzir uma contribuição às pesquisas que investigam a viabilização do uso de fibras orgânicas, especificamente de fibras extraídas da casca do coco, usadas como material de reforço, com o objetivo de produzir uma utilização razoável dessas fibras, que são jogadas no lixo após seu consumo massivo nas cidades do Brasil.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Geral

Investigar a melhora das propriedades mecânicas mediante a diminuição do recalque da areia com adição de fibras de coco. Tal ganho será mensurado pelo recalque das camadas de areia, por meio do incremento das tensões verticais, feitas através de ensaios de placa em verdadeira grandeza. A comparação será realizada entre a areia sem reforço e a areia com reforço, sendo tanto o reforço distribuído aleatoriamente na massa de areia, quanto distribuído na forma de mantas entre as camadas de areia.

1.2.2. Objetivos específicos

- Construir um equipamento para a realização de ensaios de placa em verdadeira grandeza;
- Realizar ensaios de placa na areia sem reforço e na areia reforçada com fibra de coco, com o objetivo de apresentar as curvas carga-recalque lidas pelos transdutores de deslocamento e pelo transdutor de força;
- Estudar duas formas de reforço: com as fibras cortadas distribuídas aleatoriamente e com as fibras dispostas na forma de manta; e avaliar a contribuição das fibras na mobilização de resistência da areia;

1.3. Contribuições ao estado da arte

Na procura de contribuir com o estado da arte, no conhecimento atual de solos reforçados, o presente trabalho apresenta estudos originais nos seguintes tópicos:

- Realização de ensaios de placa em verdadeira grandeza em solo reforçado com fibras de coco, para a medição do recalque *versus* carga aplicada;
- Uso de transdutores de deslocamento em solos reforçados com fibra de coco, estando dispostas em camadas e aleatoriamente distribuídas;
- Uso de areia tingida para visualização das deformações nas camadas reforçadas com fibra de coco.

1.4. Definições básicas

No início deste trabalho, torna-se importante ter definições exatas para começá-lo por um mesmo ponto de partida, no que diz respeito ao desenvolvimento da presente dissertação. Por esse motivo, apresentam-se as definições vinculadas ao material compósito, constituído pelo solo e por fibras, e as definições das principais propriedades vinculadas às fibras, no comportamento final do compósito.

Um material compósito, segundo Budinski (1996), é a combinação de dois ou mais materiais, o compósito exhibe propriedades que os componentes originais não possuem. O material compósito é constituído por uma *matriz* e por um elemento de *reforço*, sendo ambos desenvolvidos para otimizar as características inerentes a cada um destes dois componentes.

Um material compósito fibroso, segundo Matthews e Rawlings (1994), é o compósito em que os reforços são as fibras disseminadas na matriz. Para o comportamento desse tipo de material compósito, são fatores determinantes o teor de fibras presentes, o comprimento das fibras, as características do solo, a aderência entre matriz e reforço e a orientação e a repartição das fibras na matriz. As fibras controlam a abertura e o espaçamento entre as fissuras, distribuindo de forma mais uniforme as tensões dentro da matriz.

O estado de um solo, segundo Been et al. (1991), é a descrição das condições físicas sob as quais ele existe. Índice de vazios e as tensões suportadas são as variáveis primárias de estado para solos. Estrutura é uma variável de estado importante, enquanto temperatura, por exemplo, possui menor importância.

O teor de fibra é a quantidade das fibras. Um alto teor de fibras confere maior resistência pós-fissuração e menor dimensão das fissuras, desde que as fibras possam absorver as cargas adicionais causadas pelas fissuras (Taylor, 1994). Quanto maior o teor de fibra, maior é o acréscimo de resistência mecânica, até 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 e 2005; Vendruscolo, 2003; Consoli e Casagrande, 2007). O aumento do teor de fibra provoca um aumento da capacidade de absorção da energia de deformação (Maher e Ho,

1993). A inclusão de fibras aumenta a ductilidade (Gray e Ohashi, 1983; Ulbrich, 1997; Montardo et al., 2002).

O módulo de elasticidade da fibra é a razão entre a tensão e a deformação na direção da carga aplicada. Um alto valor do módulo de elasticidade causaria um efeito similar ao teor de fibra: quanto maior o módulo, maior a probabilidade que as fibras falhem por arrancamento e não por ruptura (Shewbridge e Sitar, 1990).

A aderência é a resistência ao cisalhamento que acontece na superfície de contato de dois corpos – fibra-matriz – ao tentarem deslizar-se uns sobre os outros. 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 sua resistência à tração seja mobilizada (Taylor, 1994).

A resistência é a capacidade de um material, nesse caso, a fibra, de suportar as forças de tração. Quando se aumenta a resistência das fibras, aumenta-se, também, a ductilidade do compósito, assumindo-se 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).

O comprimento é a dimensão longitudinal de um objeto – a fibra. Quanto maior for o comprimento das fibras, maior é o ganho de resistência mecânica, até um limite (Gray e Ohashi, 1983; Ulbrich, 1997; Santoni et al.; 2001; Heineck, 2002; Vendruscolo, 2003) e menor será a possibilidade delas serem arrancadas (Casagrande, 2005). Para uma dada tensão de cisalhamento superficial aplicada à fibra, esta será mais bem utilizada se seu comprimento for suficientemente capaz de permitir que a tensão cisalhante desenvolva uma tensão trativa igual à sua resistência à tração. O aumento do comprimento da fibra provoca aumento da ductilidade, (Maher e Ho, 1994) e aumento da capacidade de absorção de energia (Crockford et al., 1993; Ulbrich, 1997; Montardo et al., 2002).

A orientação é a posição das fibras no que diz respeito à direção das deformações de tração do solo. A orientação de uma fibra relativa ao plano de ruptura ou fissura influencia fortemente sua capacidade de transmitir cargas. Portanto, uma fibra que se posiciona perpendicular ao plano de ruptura tem efeito

máximo, enquanto uma, paralela, não tem esse efeito (Mc Gown 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 ruptura (Gray e Al-Refeai, 1986; Gray e Maher, 1989).

1.5. Organização da tese

Este trabalho está dividido em cinco capítulos, de acordo com as etapas de pesquisa realizadas e se inicia com este capítulo introdutório (Capítulo 1), seguido do Capítulo 2, em que é apresentada uma revisão da literatura existente, compreendendo os tópicos referentes aos principais assuntos abordados nesta pesquisa.

No Capítulo 3, descreve-se, detalhadamente, o programa experimental e apresenta-se, ainda, uma descrição dos materiais utilizados, do equipamento e do método de ensaio, bem como apresentam-se as variáveis investigadas em cada fase do trabalho.

O Capítulo 4 consiste na apresentação e análise dos ensaios de placa a verdadeira grandeza executado conforme o planejamento experimental.

As principais conclusões que representam a síntese do conhecimento adquirido durante a realização deste trabalho serão apresentadas no Capítulo 5, onde se encontram, também, sugestões para futuros trabalhos.