

## **4. Apresentação e análises dos resultados**

### **4.1. Considerações Iniciais**

Nos itens a seguir apresentam-se a descrição dos ensaios, as comparações entre os resultados, confrontando a influência do teor de umidade, da adição de fibra, da distribuição da fibra, os mecanismos de ruptura de cada ensaio e das curvas de tensão-recalque, registradas pelos ensaios de prova de carga em placa em verdadeira grandeza.

### **4.2. Descrição dos Ensaios**

#### **4.2.1. Ensaio 1: Areia Seca**

O ensaio com areia seca foi feito com a finalidade de se ter uma linha base para realizar as comparações entre os resultados das curvas carga-recalque para cada ensaio, levando em consideração a influência da umidade (ensaio 2) e a influência da fibra (ensaios 3 e 4). O ensaio foi aproveitado, ainda, para se verificar o correto funcionamento dos equipamentos utilizados.

Foram colocadas doze camadas de areia seca, com 10 cm de altura, para uma densidade relativa de 50%. A colocação foi feita por meio de um simples espalhado de areia no interior da caixa. Não foi preciso compactação alguma, além do peso da pessoa que distribuía a areia.

A falta de compactação adicional indica que a areia acomodou-se entre os vazios existentes até atingir a densidade relativa de 50%. Na figura 4.1 apresenta-se a forma de espalhamento da areia na primeira camada.



**Figura 4.1 - Espalhamento da areia**

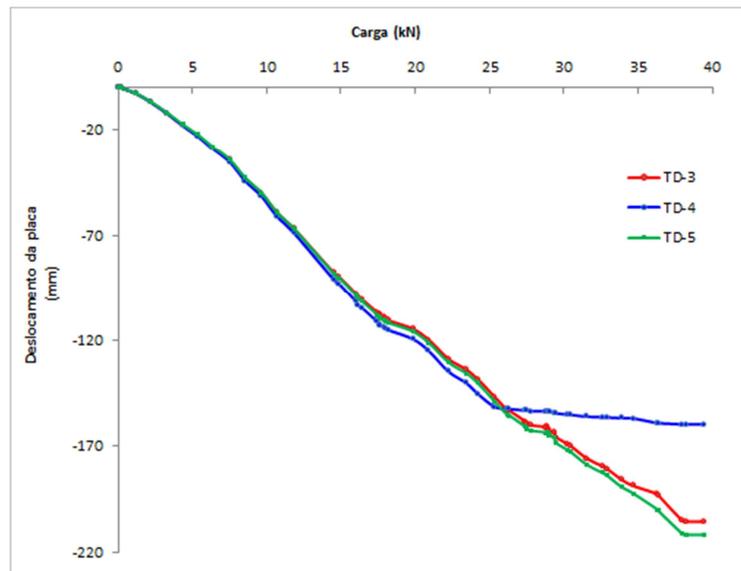
O ensaio de placa de carga começou sem problemas. As leituras dos transdutores sobre a placa mantiveram a mesma relação, o que manifesta que a placa afundava-se na areia, mantendo um regular alinhamento. Isto aconteceu até os primeiros 12 kN.

A partir desse valor, os grãos de areia seca preencheram os espaços livres da mola dos transdutores de deslocamento, o que impediu a realização de leituras nos equipamentos. O ensaio foi parado para acomodar os transdutores, retirando a areia presa nas molas a fim de prosseguir, até que, aproximadamente no carregamento de 26 kN, a areia começou a cair sobre a placa, cobrindo o transdutor 4. O ensaio continuou porque os transdutores 3 e 5 continuaram registrando os recalques.

Perto do carregamento de 35 kN, começou-se a ouvir a flambagem das paredes da caixa de ensaios, fato que mostrou que a areia não conseguia resistir mais ao carregamento imposto, já que suas tensões estavam sendo transmitidas até as paredes. Portanto, tornou-se necessário concluir o ensaio.

É importante salientar que nos ensaios seguintes, feitos com areia úmida, não aconteceu queda alguma da areia sobre a placa, devido à coesão aparente presente na areia no momento do ensaio. A maior carga registrada no primeiro ensaio com areia seca foi de 39,46 kN.

A figura 4.2 apresenta a evolução dos carregamentos contra os recalques obtidos sobre a placa de aço. O registro do ensaio é apresentado no Anexo.

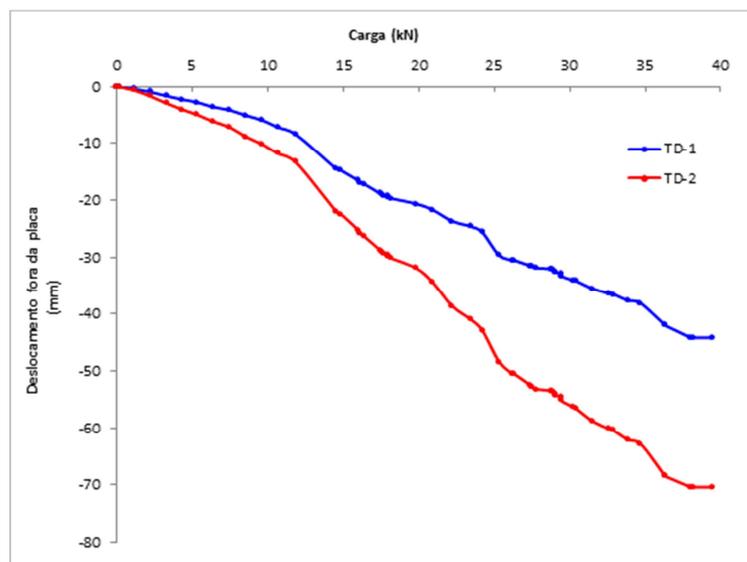


\*TD: Transdutor de deslocamento

**Figura 4.2 - Carga - recalque - Transdutores 3, 4 e 5 (areia seca)**

Como foi dito anteriormente, o transdutor 4 ficou sem conseguir fazer mais leituras, o que é facilmente visível na figura 4.2.

Os outros transdutores sobre a placa continuaram registrando as informações, até que o ensaio foi finalizado. Os registros dos transdutores fora de placa são apresentados na figura 4.3.

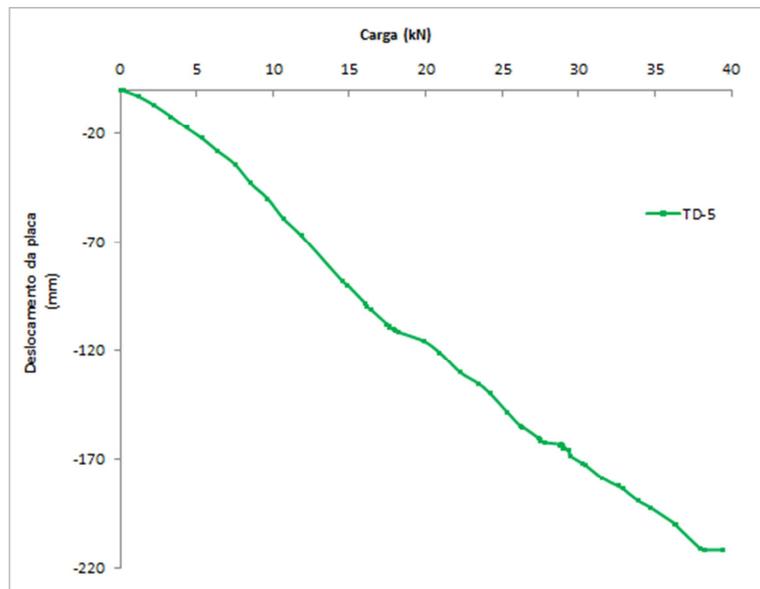


\*TD-1: Transdutor de deslocamento – 15 cm do bordo da placa

\*TD-2: Transdutor de deslocamento – 5 cm do bordo da placa

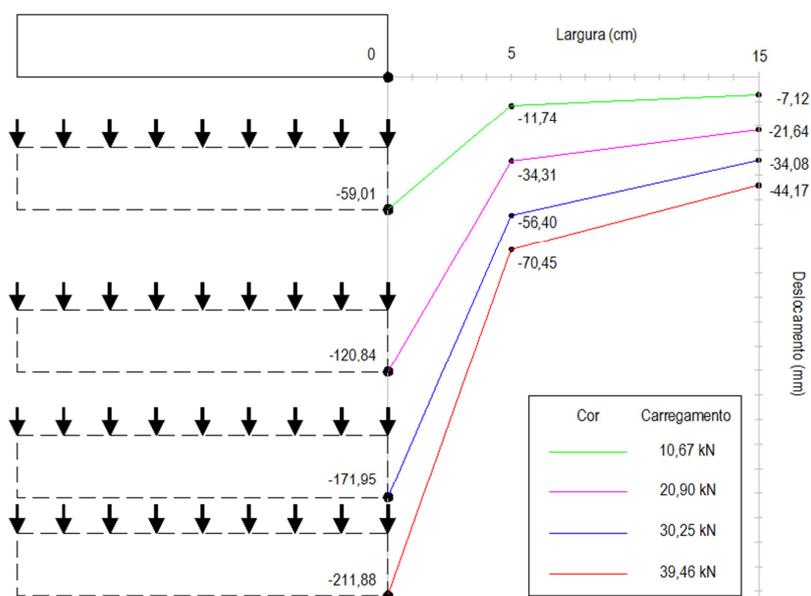
**Figura 4.3 - Carga - recalque - Transdutores 1 e 2 (areia seca)**

Para uma melhor visualização e posterior comparação dos resultados entre os ensaios, na figura 4.4 apresenta a curva carga-recalque, representativa do ensaio 1, registrada apenas na placa de aço.



**Figura 4.4 - Carga - recalque - Areia Seca**

A figura 4.5 apresenta as leituras de recalques fora da placa para quatro diferentes níveis de carregamento, 10,67; 20,90; 30,25 e 39,46 kN, correspondentes a quatro níveis de recalque abaixo da placa de 59,01; 120,84; 171,95 e 211,88 mm, respectivamente. Os pontos de monitoramento ocorreram em distâncias de 5 e 15 cm da borda da placa.



**Figura 4.5 - Recalques fora da placa - Areia Seca**

A figura 4.6 mostra a disposição inicial dos equipamentos de carregamento e de leitura de recalques, sobre a areia seca, antes do ensaio.



**Figura 4.6 - Posição inicial dos equipamentos - Areia Seca**

Na figura 4.7, apresenta-se a disposição final dos equipamentos, quando da conclusão do ensaio.



**Figura 4.7 - Posição final dos equipamentos - Areia Seca**

Neste ensaio, não foi possível fazer a exumação da areia seca, devido à falta de estabilidade do material. No momento da retirada de um dos painéis laterais, a areia começou a desmoronar rapidamente. Nos ensaios com areia úmida, atingiu-se a estabilidade do material e, por esse motivo, foi possível fazer a exumação, conforme se apresentará nos itens seguintes.

#### 4.2.2. Ensaio 2: Areia úmida

O ensaio com areia úmida foi feito com a finalidade de determinar a influência da umidade no incremento de resistência da areia sem fibra.

Neste ensaio, a primeira etapa foi o umedecimento da areia, utilizando uma betoneira de 400 litros de capacidade, para atingir o teor de umidade de 10%. Foi importante o controle do tempo de mistura para assegurar uma correta distribuição da água nos grãos da areia, evitando aglomerações de finos, resultantes do excesso de tempo na rotação da betoneira.

A colocação das camadas de areia úmida foi feita do mesmo jeito do ensaio anterior. Neste caso, o umedecimento da areia incrementou, visivelmente, o volume do material, tendo que se realizar, em algumas zonas, uma mínima compactação manual, para atingir 50% da densidade relativa requerida.

No ensaio 1, as deformações atingiram um máximo de 21 cm, porém, neste ensaio, até uma profundidade de 50 cm, utilizamos uma camada de 1 cm de espessura de areia tingida de cor azul, afastada 10 cm a cada camada, para ter uma melhor visualização dos recalques da areia na exumação da caixa. Nas figuras 4.8 e 4.9, apresenta-se a posição da areia tingida entre as camadas de análises na caixa de ensaios.

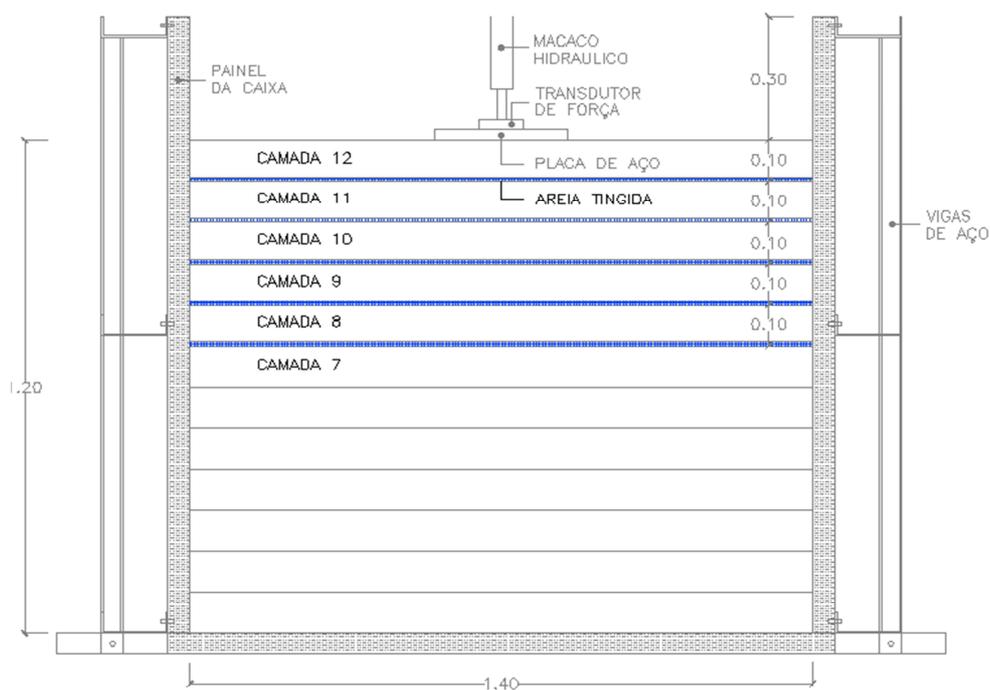
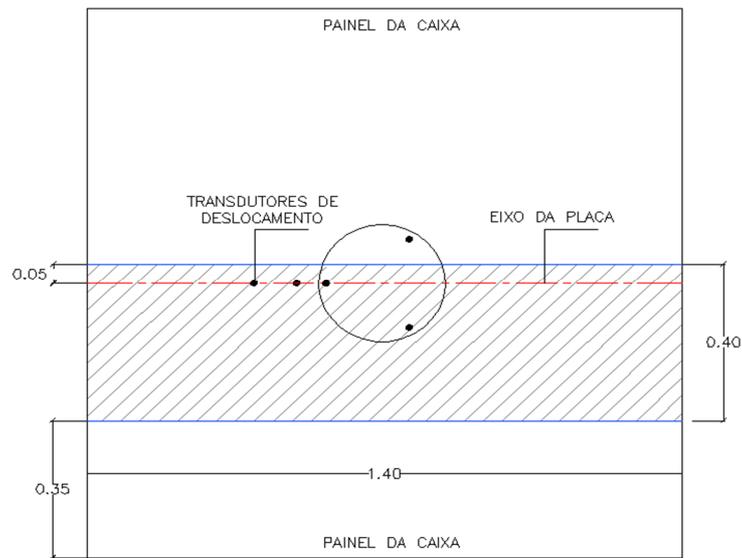


Figura 4.8 - Colocação da areia tingida - vista elevação



**Figura 4.9 - Colocação da areia tingida - vista superior**

Para assegurar que a tinta da areia não seja diluída pela umidade das camadas, realizaram-se testes, colocando pequenas camadas de areia, com 10% de umidade, e areia tingida entre elas. Depois disso, aplicou-se um carregamento com um corpo-de-prova de concreto, simulando a ação da placa de aço.

O resultado foi o esperado: a cor da areia não se perdeu e mostrou a deformação sofrida pelo carregamento, como se pode observar na figura 4.10.



**Figura 4.10 - Provas com areia tingida**

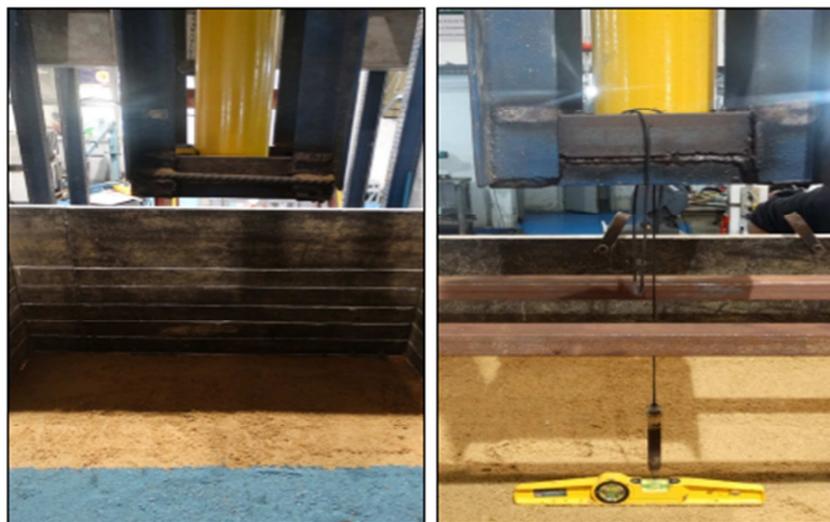
Como foi mostrado na figura 4.8, após a camada 7, começou-se a utilizar a areia tingida, colocando-se uma camada de 1 cm de espessura para haver o nivelamento e, finalmente, colocando a camada seguinte acima da primeira.

Quando a colocação de todas as camadas não podia ser feita somente num dia, por questões de horários de laboratório ou disponibilidade de apoio para movimentar os sacos de areia úmida, a caixa de ensaios era coberta com lona plástica a fim de evitar perdas de umidade até o momento da colocação das camadas seguintes e a execução do ensaio, como se mostra na figura 4.11.



**Figura 4.11 - Cobertura plástica sobre a caixa**

Previamente à colocação da placa de aço, verifica-se o nivelamento da superfície da camada 12. Igualmente, era verificado o fato de que a placa tinha que ser colocada exatamente no eixo do carregamento, como mostrado nas figuras 4.12 e 4.13.



**Figura 4.12 - Colocação de areia tingida e nivelção da camada**



**Figura 4.13 - Nivelção vertical e horizontal da placa de aço**

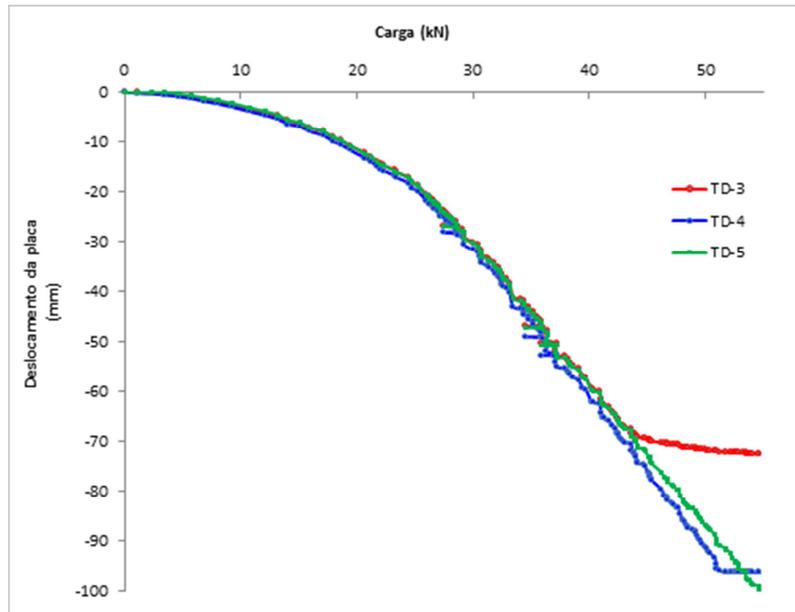
Assegurado o nivelamento da placa, foram colocados os elementos de transmissão de carga, o transdutor de força e, finalmente, os transdutores de deslocamento fixos sob as vigas de aço para evitar rotação, enquanto a areia era deformada. A posição final dos equipamentos é apresentada na figura 4.14.



**Figura 4.14 - Colocação dos transdutores de deslocamento**

O ensaio transcorreu sem problemas. A placa superou o carregamento obtido no ensaio de areia seca de 39,46 kN. Somente o transdutor TD-3, aproximadamente na carga de 42,0 kN, ficou com areia presa na mola, produto de um desmoronamento num dos lados da placa. O ensaio foi finalizado quando se observou uma perda de alinhamento vertical, produto da rotação da placa de aço.

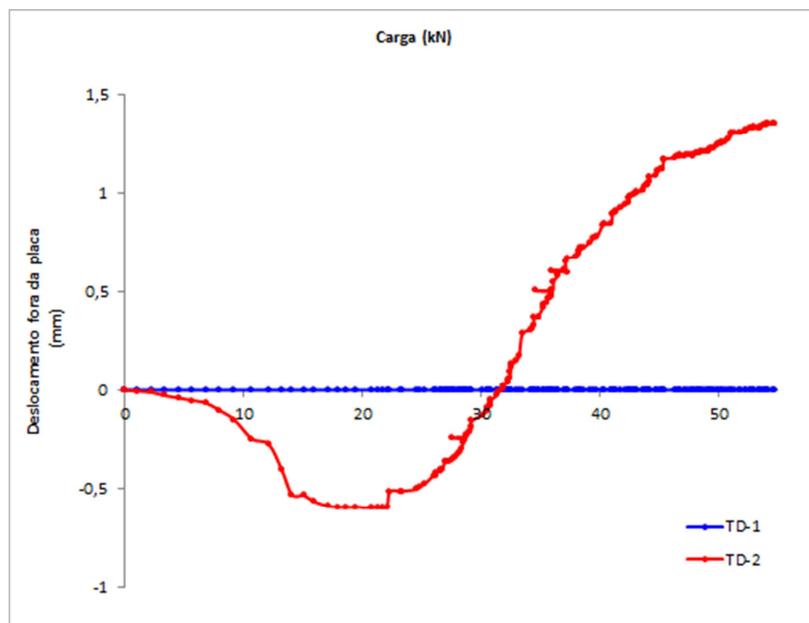
A carga máxima registrada foi de 54,69 kN. A figura 4.15 mostra a evolução dos carregamentos contra os recalques obtidos sobre a placa de aço. O registro do ensaio é apresentado no Anexo.



\*TD: Transdutor de deslocamento

**Figura 4.15 - Carga - Recalque - Transdutores 3, 4 e 5 (areia úmida)**

Os registros dos transdutores fora da placa são mostrados na figura 4.16.



\*TD-1: Transdutor de deslocamento – 15 cm do bordo da placa

\*TD-2: Transdutor de deslocamento – 5 cm do bordo da placa

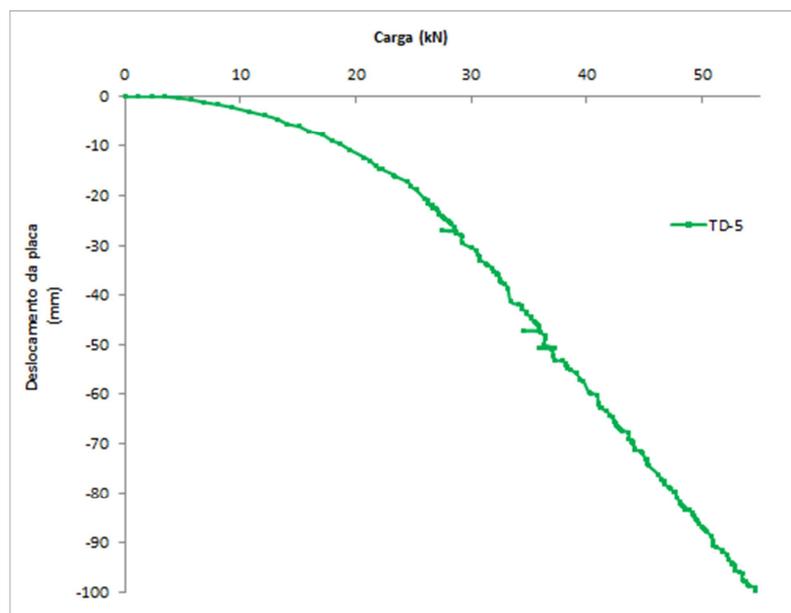
**Figura 4.16 - Carga - Recalque - Transdutores 1 e 2 (areia úmida)**

Percebe-se que o transdutor a 15 cm da placa não registrou nenhuma movimentação da areia, enquanto era aplicado o carregamento. Portanto, no

próximo ensaio, esse transdutor de deslocamento será colocado a 10 cm da borda da placa, para haver registros e poder fazer comparações.

O transdutor colocado a 5 cm da placa registrou, nas fases de recalque, primeiro, um afundamento da areia junto com a placa e, posteriormente, com o incremento da carga, ocorreu um visível levantamento da areia, fenômeno esse que será tratado em itens posteriores.

Para uma melhor visualização e posterior comparação dos resultados entre os ensaios, a figura 4.17 apresenta a curva carga-recalque, representativa do ensaio 2, registrada apenas na placa de aço.



**Figura 4.17 - Carga - Recalque - Areia Úmida sem Fibra**

A figura 4.18 apresenta um comparativo entre os recalques fora da placa, lidos pelos transdutores 1 e 2. Segundo o registro do ensaio 2, nota-se que, a uma distância de 15 cm da borda da placa, não há registros, portanto, é importante movimentar esse ponto para 10 cm da placa para a realização de ensaios posteriores.

Para o ensaio 2, apresentam-se as leituras de recalques para seis diferentes níveis de carregamento, 10,72; 20,74; 30,08; 40,18, 50,14 e 54,69 kN, correspondentes a seis níveis de recalques abaixo da placa de 2,98; 12,32; 30,38; 59,73; 87,19 e 99,64 mm, respectivamente.

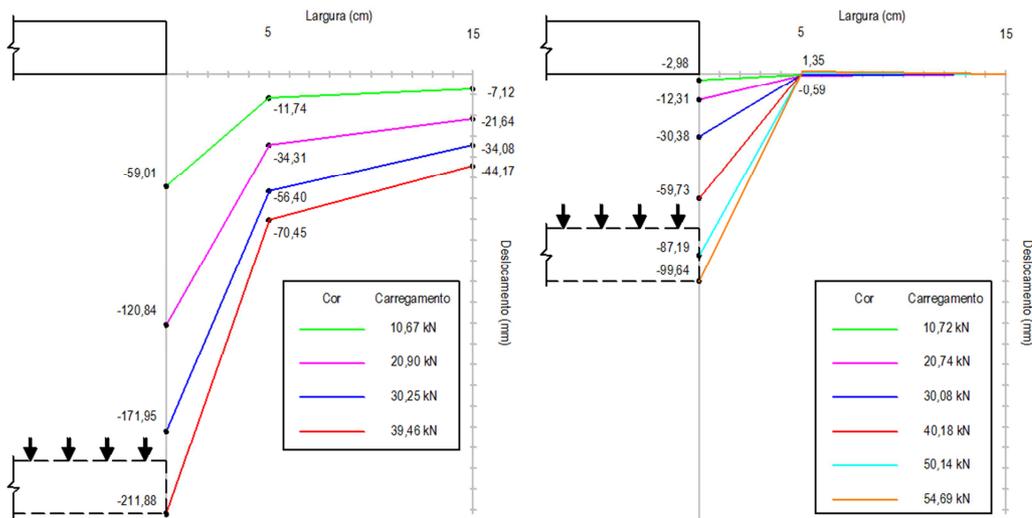


Figura 4.18 - Comparativo dos recalques (Areia Seca e Areia úmida)

#### 4.2.3.

#### Ensaio 3: Areia úmida com fibras inseridas em manta

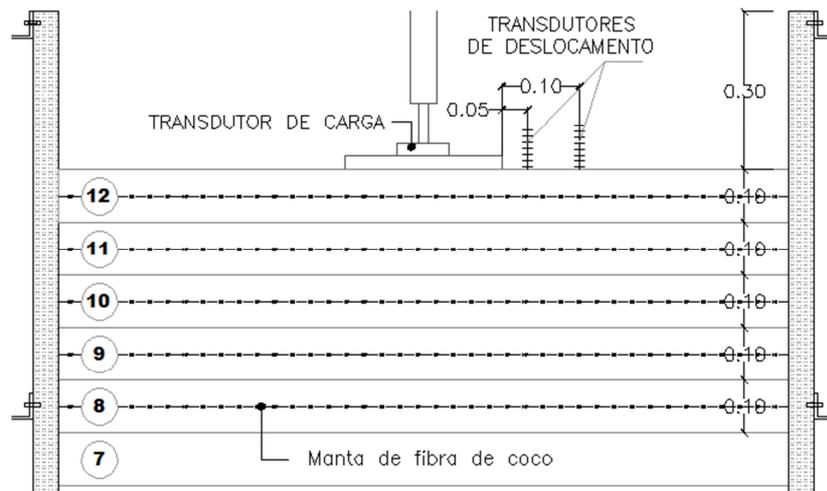
Neste ensaio, as fibras como reforço da areia foram utilizadas, com uma distribuição em mantas arranjadas na metade de cada camada de areia a partir da camada 8 até a 12, as quais serão camadas de análise, conforme o padrão de colocação da areia tingida, estabelecido no ensaio anterior, para haver a comparação visual dos recalques apresentados.

O ensaio de areia úmida com fibra em camadas foi feito com a finalidade de se determinar a influência da adição de mantas de fibra na massa de solo, para atingir um incremento de resistência e diminuição do recalque.

O umedecimento da areia foi executado com uma betoneira de 400 litros. Os materiais foram pesados com uma balança eletrônica, com 100 g de precisão. Quando foi garantido um teor de umidade aproximado de 10% em toda a areia o material foi colocado na caixa de ensaios até a camada 7. A partir da base da camada 8, foi colocada a areia tingida, segundo a distribuição padrão.

Depositou-se a metade da camada úmida 8 e se iniciou a colocação da manta, as fibras de coco eram desfiadas manualmente. A quantidade da fibra utilizada é de 0,5% com relação ao peso da areia seca.

A colocação das camadas posteriores foi feita do mesmo jeito. A figura 4.19 apresenta a disposição das mantas de fibras na caixa de ensaios.



**Figura 4.19 - Distribuição da manta de fibra de coco**

O volume da fibra de coco parecia maior do que o da areia, mas, ao se colocar a segunda metade da camada de areia, o peso desta fez com que o volume da fibra fosse reduzido em, aproximadamente, 1 cm de espessura, o que formará a manta de fibra de coco.

A colocação das camadas de areia úmida foi feita do mesmo jeito que o do ensaio anterior. Em algumas zonas, foi preciso realizar uma mínima compactação manual para atingir as 50% de densidade relativa requerida. Foram feitos todos os controles prévios ao ensaio, tais como pesagem dos materiais, teor de umidade, alinhamento da placa e sistema de carregamento.

Cabe indicar que as fibras foram colocadas por simples desfiado sem utilizar nenhuma técnica de enlace ou ligação entre elas, como se mostra na figura 4.20.



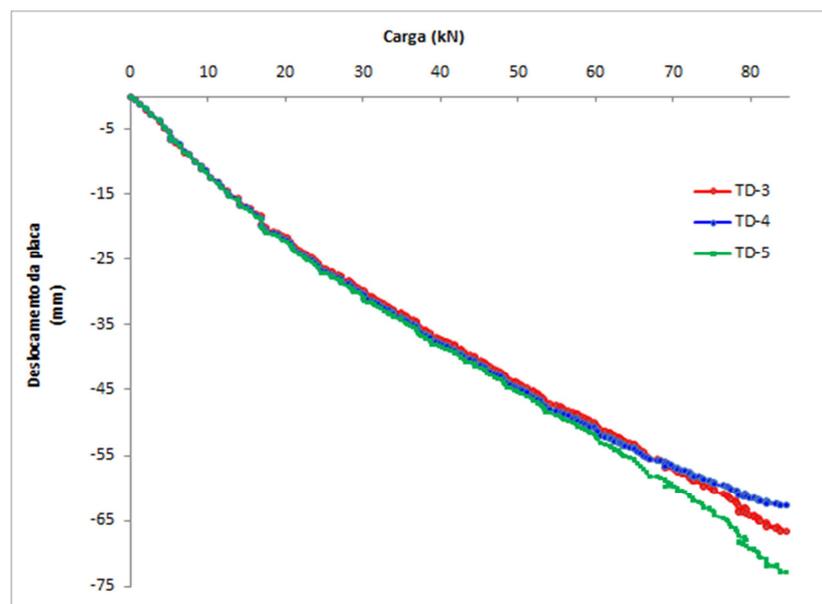
**Figura 4.20 - Colocação da manta de fibra de coco**

Neste ensaio os transdutores de deslocamento sobre a placa tiveram registros uniformes até o carregamento de 60,0 kN. Depois disso, a placa começou mostrando pequenas rotações até que o ensaio foi parado pelo desalinhamento vertical do eixo de carga como é mostrado na figura 4.21.



**Figura 4.21 - Rotação da placa de aço**

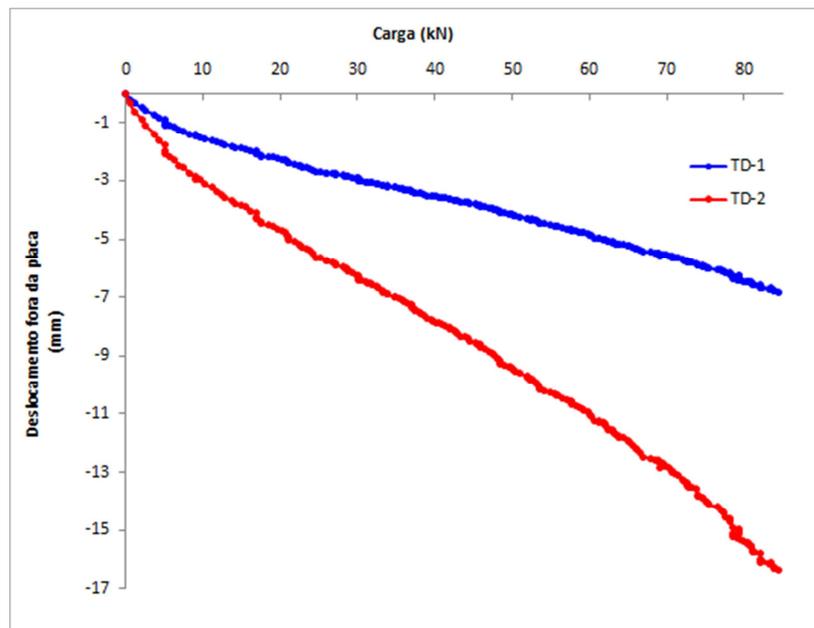
A carga máxima registrada foi de 84,53 kN. Na figura 4.22, apresenta-se a evolução dos carregamentos contra os recalques obtidos sobre a placa de aço. O registro do ensaio é apresentado no Anexo.



\*TD: Transdutor de deslocamento

**Figura 4.22 - Carga - Recalque - Transdutores 3, 4 e 5 (fibra em manta)**

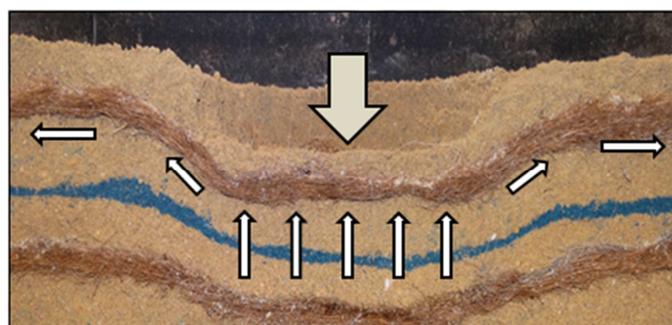
Como foi dito no ensaio anterior, desta vez, o transdutor 1 foi reposicionado a 10 cm da borda da placa, com a finalidade de se produzirem registros e se conseguir uma comparação com o ensaio 4, em que também precisou haver reforço de fibra. Os registros dos transdutores fora de placa são mostrados na figura 4.23.



\*TD-1: Transdutor de deslocamento – 10 cm do bordo da placa  
 \*TD-2: Transdutor de deslocamento – 5 cm do bordo da placa

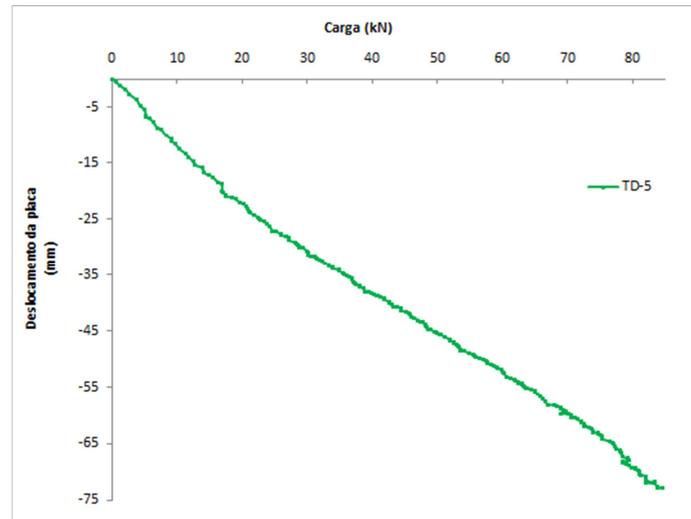
**Figura 4.23 - Carga - Recalque - Transdutores 1 e 2 (fibra em manta)**

Como é apresentado na figura 4.23, aproximadamente a partir do carregamento de 10,0 kN, a tendência dos recalques tornou-se quase linear, o que acontece devido à influência da manta de fibra de coco que redistribui as tensões como mostra a figura 4.24, devido ao mecanismo de membrana que será comentado no item 4.3.2.



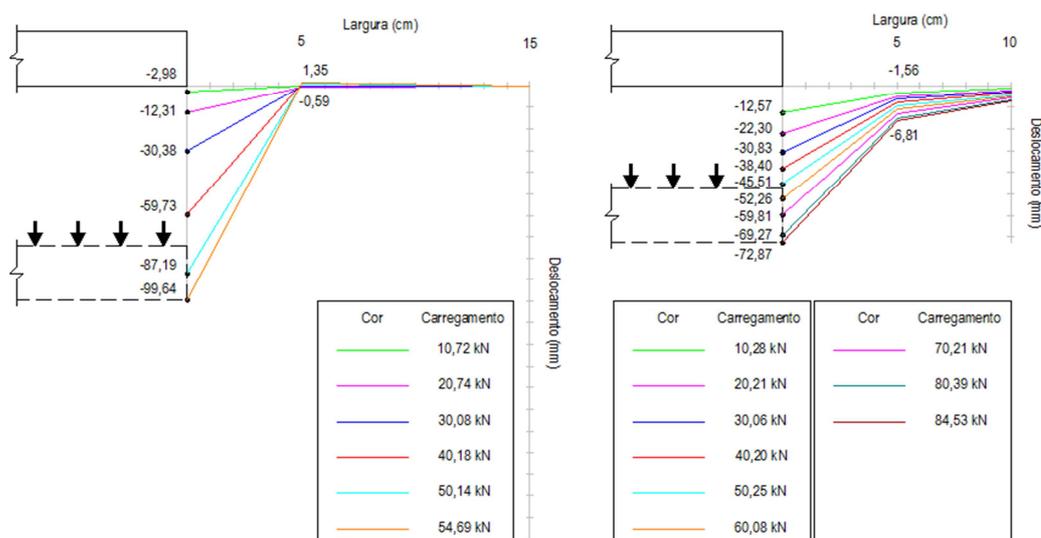
**Figura 4.24 - Distribuição de tensões (fibra em manta)**

Para uma melhor visualização e posterior comparação dos resultados entre os ensaios, a figura 4.25 apresenta a curva carga-recalque, representativa do ensaio 3, registrada apenas na placa de aço.



**Figura 4.25 - Carga - Recalque - Areia Úmida com fibra em manta**

A figura 4.26 apresenta as leituras de recalques fora da placa para nove diferentes níveis de carregamento, 10,28; 20,21; 30,06; 40,19; 50,25; 60,08; 70,21; 80,37 e 84,53 kN, correspondentes aos nove níveis de recalques abaixo da placa de 12,57; 22,30; 30,83; 38,40; 45,51; 52,26; 59,81; 69,27 e 72,87 mm, respectivamente. Os pontos de monitoramento ocorreram a distâncias de 5 e 10 cm da borda da placa.



**Figura 4.26 - Comparativo dos recalques Areia úmida sem fibra e Areia úmida com fibra (manta)**

#### 4.2.4.

#### **Ensaio 4: Areia úmida com fibras inseridas aleatoriamente**

No presente ensaio, a fibra foi colocada em distribuição aleatória dentro da camada de areia úmida com fibras cortadas com comprimento de 50 mm. A mistura areia-fibra é colocada a partir da camada 8, até a 12, as quais são as camadas de análise, conforme o padrão de colocação da areia tingida, estabelecida no ensaio 2, para a comparação visual dos recalques apresentados.

O ensaio de areia úmida com fibra aleatória foi feito com a finalidade de se determinar a influência da adição de fibra de coco cortada na massa de solo, para atingir um incremento de resistência e diminuição do recalque.

A preparação da mistura foi executada com uma betoneira de 400 litros. Os materiais foram pesados com uma balança eletrônica com 100 g de precisão. As fibras foram desfiadas manualmente e cortadas para se obter o comprimento aproximado de 50 mm, a fim de haver um maior êxito na mistura.

Para uma distribuição certa das fibras na areia, dentro da betoneira desligada, primeiramente, foi colocado um décimo da areia seca com uma pequena quantidade de água esparzida pela superfície para não gerar poeira no lugar de trabalho. Depois, colocou-se um décimo da fibra desfiada sobre a superfície úmida. Esse procedimento foi feito até se colocar 50% do peso da areia seca dentro da betoneira. Logo depois disso, ligava-se a betoneira com a adição da metade da água total. Aproximadamente após 7 minutos de mistura, verificava-se a qualidade da massa e se realizava, novamente, o mesmo procedimento com a outra metade dos materiais.

Com esse procedimento, a qualidade da mistura foi evidenciada após duas experiências erradas que foram descartadas. Os principais problemas na mistura foram os seguintes:

- (1) Excesso de tempo entre a ligação da betoneira e a colocação total da fibra desfiada; o processo de desfiado da fibra é lento, além do fato de que as fibras já cortadas com o comprimento certo tendem a se enlaçar no contato entre elas, pelo efeito de sua rugosidade superficial, o que gera uma agrupação de fibra que não se mistura com a areia;
- (2) O excesso de tempo provoca agrupamento de finos formando massas de interior seco, compacto com superfície úmida. Por ser colocado esse

material, as camadas apresentariam mais lacunas e o volume seria maior do que o habitual, segundo o procedimento de controle visual da densidade relativa incorretamente dever-se-ia fazer uma compactação maior para se atingirem os limites marcados, pelo excesso de volume na mistura, mas o material não seria uniforme.

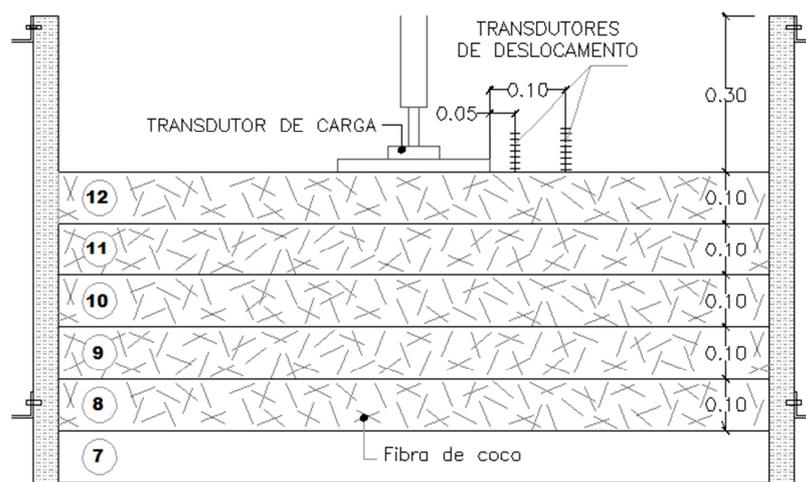
- (3) O excesso de tempo também influencia na perda da umidade considerada para se fazer os ensaios.

Também houve complicação na colocação da mistura, devido ao fato de que a betoneira ficava fora do laboratório para evitar a poeira no local, portanto, a mistura era colocada em sacos de uma tonelada de capacidade, com uma válvula reguladora de abertura ao fundo, que só era aberta quando o saco era levado, por meio de uma grua ponte, até a caixa de ensaios.

Uma vez aberta a válvula, a mistura não caía na caixa, porque as fibras prendiam a areia dentro do saco, por isto, foi necessário virar totalmente o saco para se colocar a mistura areia-fibra.

A acomodação da mistura dentro da caixa foi outra dificuldade, visto que as fibras não permitiam que areia fosse nivelada por simples espalhamento: era preciso acomodar a mistura em blocos de tamanho similar para evitar que se puxasse a fibra da areia com qualquer ferramenta.

Depositou-se a mistura areia-fibra desde a camada 8 até a camada 12, colocando-se, entre as camadas, a areia tingida, segundo a distribuição padrão, arranjada nos ensaios anteriores. A figura 4.27 mostra a colocação da mistura areia-fibra na caixa de ensaios.



**Figura 4.27 - Distribuição aleatória da fibra de coco**

Para este ensaio o transdutor 1 também foi movimentado para 10 cm do bordo da placa com a finalidade de poder fazer comparações com o ensaio 3, a posição inicial dos transdutores é apresentada na figura 4.28.



**Figura 4.28 - Posição inicial dos transdutores de deslocamento (fibra aleatória)**

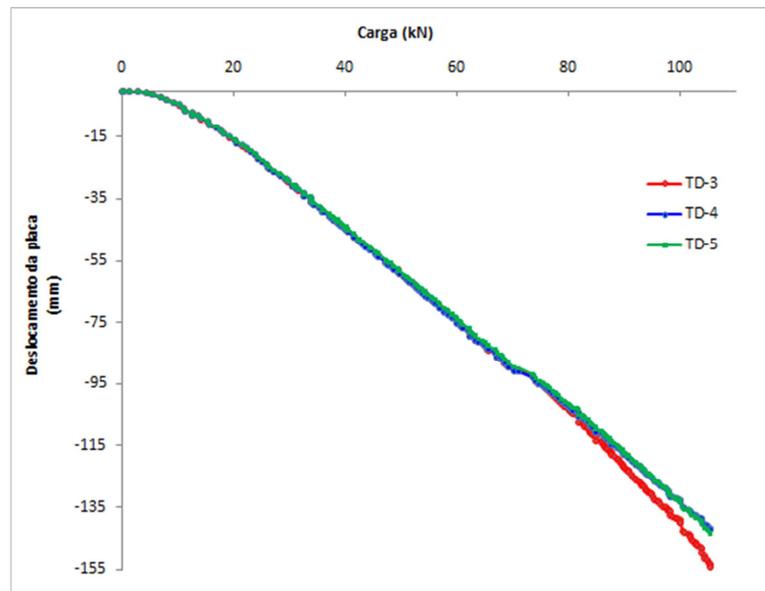
No transcurso do ensaio, os transdutores de deslocamento sobre a placa tiveram registros uniformes até o carregamento de 80,0 kN. Depois disso, foi necessário parar o ensaio para reacomodar os transdutores que estavam chegando a seu máximo comprimento (100 mm). Apresenta-se a posição final dos transdutores de deslocamento na figura 4.29.



**Figura 4.29 - Posição final dos transdutores de deslocamento (fibra aleatória)**

Os registros posteriores também mostraram que a placa começou tendo pequenas rotações, afastando as leituras do transdutor TD-3 dos outros. A carga

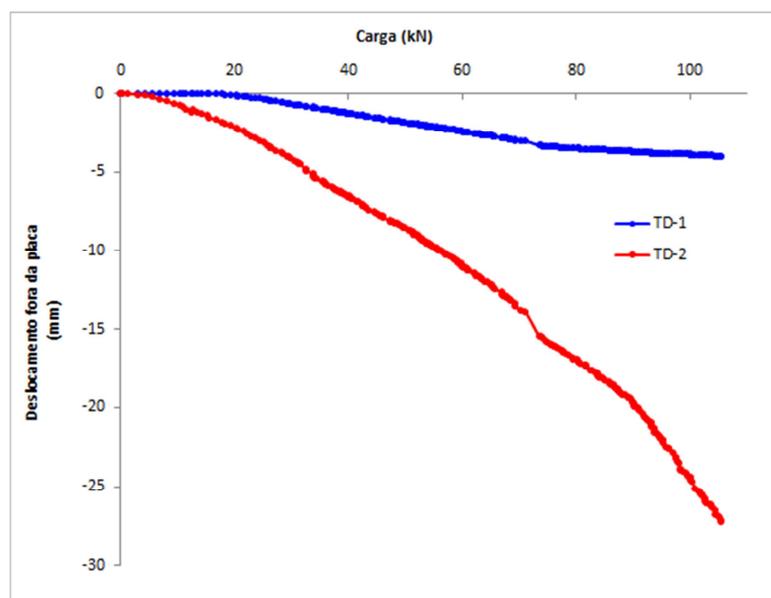
máxima registrada foi de 105,5 kN. Na figura 4.30, apresenta-se a evolução dos carregamentos contra os recalques obtidos sobre a placa de aço. O registro do ensaio é apresentado no Anexo.



\*TD: Transdutor de deslocamento

**Figura 4.30 - Carga - recalque - Transdutores 3, 4 e 5 (fibra aleatória)**

Do mesmo jeito que no ensaio anterior, o transdutor 1 foi reposicionado aos 10 cm da borda da placa. Os registros dos transdutores fora de placa são mostrados na figura 4.31.

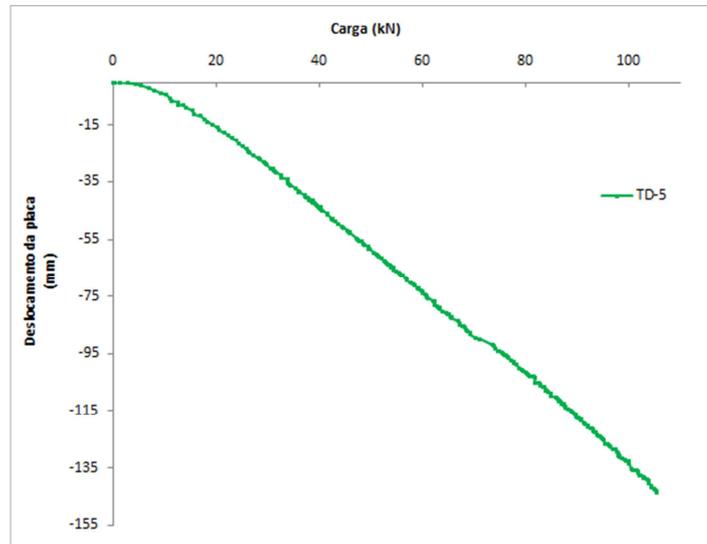


\*TD-1: Transdutor de deslocamento – 10 cm do bordo da placa

\*TD-2: Transdutor de deslocamento – 5 cm do bordo da placa

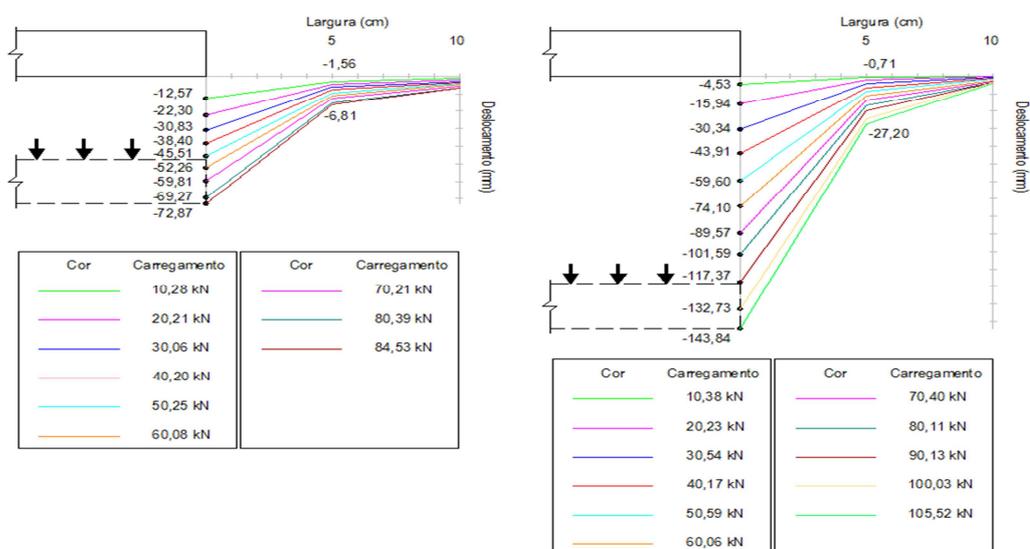
**Figura 4.31 - Carga - recalque - Transdutores 1 e 2 (fibra aleatória)**

Para uma melhor visualização e posterior comparação dos resultados entre os ensaios, na figura 4.32 apresenta a curva carga-recalque representativa do ensaio 4, registrada apenas na placa de aço.



**Figura 4.32 - Carga – Recalque – Areia Úmida com fibra aleatória**

A figura 4.33 apresenta as leituras de recalques fora da placa para onze diferentes níveis de carregamento, 10,38; 20,23; 30,54; 40,17; 50,59; 60,06; 70,40; 80,11; 90,13; 100,03 e 105,52 kN, correspondentes aos onze níveis de recalques abaixo da placa de 4,53; 15,94; 30,34; 43,91; 59,60; 74,10; 89,57; 101,59; 117,37; 132,73 e 143,84mm, respectivamente.



**Figura 4.33 - Comparativo dos recalques Areia úmida com fibra em manta e com fibra aleatória**

Podemos notar que a distribuição aleatória da fibra começou trabalhar desde os primeiros incrementos de carga reduzindo os recalques iniciais enquanto a manta conseguiu reduzir melhor os recalques para os maiores carregamentos.

### 4.3. Exumação dos ensaios úmidos

#### 4.3.1. Ensaio 2: Areia úmida

Não existiu dificuldade alguma na exumação deste ensaio. O procedimento foi simples: primeiramente, retirava-se o menor dos painéis frontais e, depois, retirava-se a areia que estava em contato direto com o painel maior do mesmo lado da caixa. Isso ocorria com a finalidade de se eliminar o atrito entre o painel e a areia compactada, que impedia a liberação da parede ao ser puxada para cima. Logo depois disso, com a grua ponte, elevava-se o painel maior e a caixa de areia era descoberta como mostra a figura 4.34, enquanto a figura 4.35 mostra o corte feito até o eixo de carregamento.



Figura 4.34 - Retiro do Painel para exumação



Figura 4.35 - Exumação da areia - Ensaio 2

A utilização da areia tingida entre as camadas 8 e 12 mostrou-se eficiente na visualização das deformações individuais de cada camada.

Na figura 4.36, é possível observar uma deformação considerável das primeiras camadas de areia, logo abaixo da placa de aço, sendo que, a partir da camada 9, não há deformações importantes. O recalque máximo registrado para um carregamento de 54,69 kN foi de 99,64 mm.

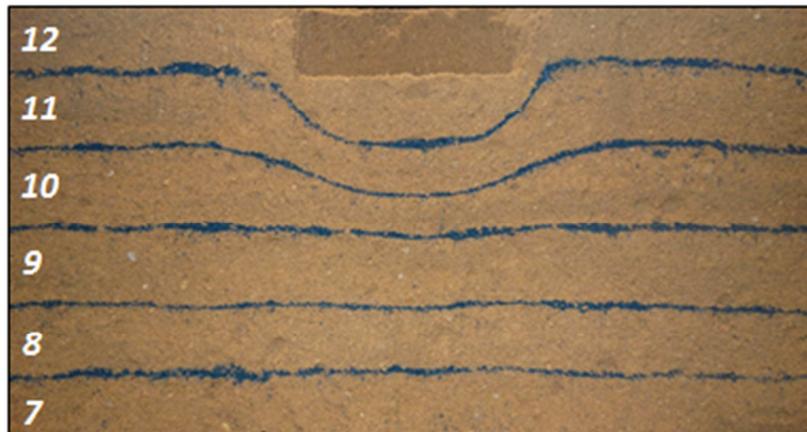


Figura 4.36 - Corte até o eixo de carregamento - Ensaio 2

#### 4.3.2.

##### Ensaio 3: Areia úmida com fibras inseridas em manta

A dificuldade nesta exumação ocorreu devido ao corte que tinha que ser feito na manta de fibra de coco para se atingir o eixo de carregamento. A figura 4.37 mostra o corte da caixa e os recalques apresentados.



Figura 4.37 - Exumação da areia - Ensaio 3

Na figura 4.38 se mostra a deformação da manta por efeito do mecanismo de membrana, esse mecanismo é gerado quando o solo se movimenta na direção do sentido da gravidade devido à carga aplicada, por isto, o reforço é deformado formando uma curva para cima produto da redistribuição das tensões. Para desenvolver o mecanismo de membrana é preciso certa quantidade de deformação do reforço e certo comprimento para evitar que o reforço seja arrancado. O recalque máximo registrado para um carregamento de 84,53 kN foi de 72,86 mm.



Figura 4.38 - Corte até o eixo de carregamento - Ensaio 3

#### 4.3.3.

#### Ensaio 4: Areia úmida com fibras inseridas aleatoriamente

A dificuldade nesta exumação aconteceu devido ao corte da mistura, porque as fibras puxavam o solo, sob o qual estavam depositadas, não permitindo que se criasse uma superfície vertical para que os recalques da areia tingida fossem vistos. A figura 4.39 mostra o corte da caixa e os recalques registrados.



Figura 4.39 - Exumação da areia - Ensaio 4

Na figura 4.40, observam-se pequenos buracos deixados pelas fibras tiradas que arrastaram o solo com elas, devido à forte conexão entre esses materiais.

O recalque máximo registrado para um carregamento de 105,52 kN foi de 143,84 mm.

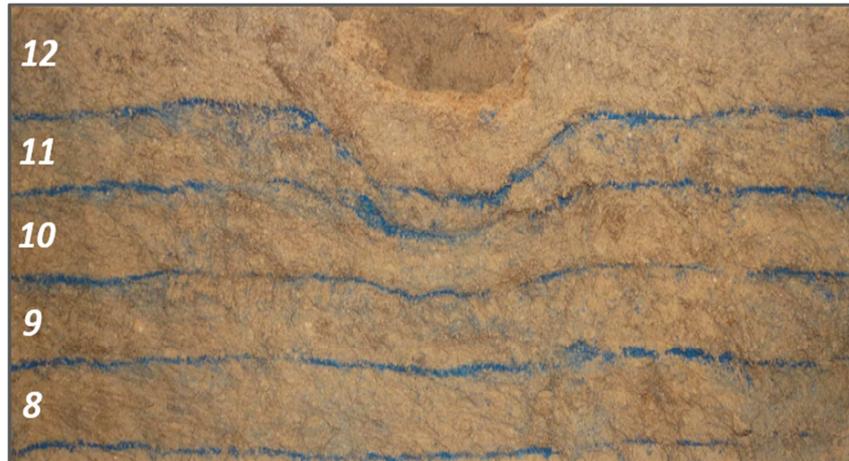


Figura 4.40 - Corte até o eixo de carregamento - Ensaio 4

#### 4.4. Influência do teor de umidade

A figura 4.41 mostra as curvas tensão-recalque da areia seca e da areia com um teor de umidade de 10%. Pode-se perceber que a curva correspondente à areia úmida apresenta um menor recalque sob um maior carregamento, comparada com a areia seca. A tabela 4.1 mostra um comparativo entre os recalques, para cada acréscimo de tensão em kPa.

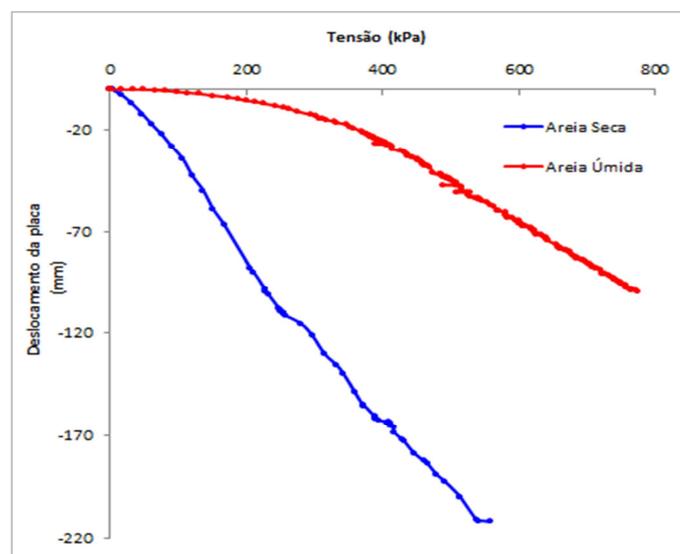


Figura 4.41 - Influência do teor de umidade

Tabela 4.1 - Porcentagem de redução de recalque por adição de umidade

Tensão (kPa)	Recalque (mm)		Redução por umidade (%)
	Areia seca	Areia úmida	
100	34,2	1,1	96,8
200	88,1	5,5	93,8
300	120,8	13,0	89,2
400	163,1	25,7	84,2
500	192,5	45,4	76,4

Pode-se ver que a adição de umidade cria um incremento na resistência maior que 50%. O ganho de resistência da areia úmida é por causa das forças capilares e seu efeito nas tensões efetivas.

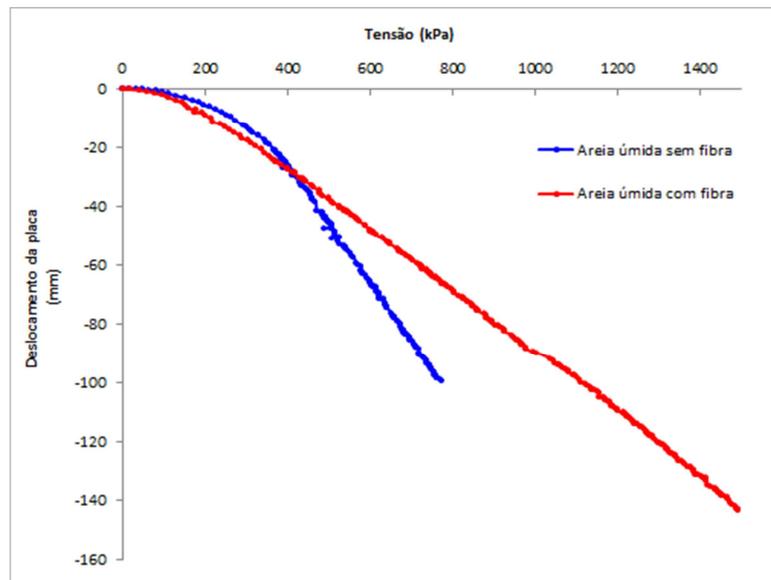
#### 4.5. Influência da adição de fibra

Foi estabelecido como padrão um teor de fibra de 0,5% do peso total da areia seca. Esse valor foi definido com base na revisão bibliográfica dos estudos realizados sobre reforço de solos com fibras de polipropileno, devido à falta de estudos feitos com fibras de coco.

A figura 4.42 mostra a influência da adição de fibra aleatória na areia úmida. Como se pode ver, inicialmente, não existe muita diferença entre os recalques com e sem fibra. A figura mostra que, até 400 kPa, a areia sem fibra desloca-se menos do que a areia com fibra para as mesmas tensões. Isto pode ser causado por causa de uma maior compactação da areia sem fibra no momento da conformação das últimas camadas da areia úmida. Após essa tensão, começa-se a perceber uma diferença maior entre os recalques: é, justamente, nesse momento que a fibra começa trabalhar.

Então, torna-se possível determinar que as tensões, primeiramente, são resistidas pela areia úmida e que o trabalho de reforço das fibras é somente requerido quando a areia não suporta mais a tensão atuante. Deste modo, é possível pensar que as fibras trabalham quando a areia entra em um estado de pós-fissuração.

Finalmente, é possível observar que, após a ruptura da areia sem fibra, os recalques são maiores por causa do aumento da tensão, enquanto a areia com reforço de fibra continua resistindo a tensões atuantes.



**Figura 4.42 - Influência da adição de fibra (aleatória)**

A tabela 4.2 mostra um comparativo entre os recalques para cada acréscimo de tensão em kPa. Pode-se observar que a fibra trabalha melhor em maiores solicitações de tensão, diminuindo o recalque, comparando-se com a areia sem fibra.

**Tabela 4.2 - Porcentagem de redução de recalque por adição de fibra**

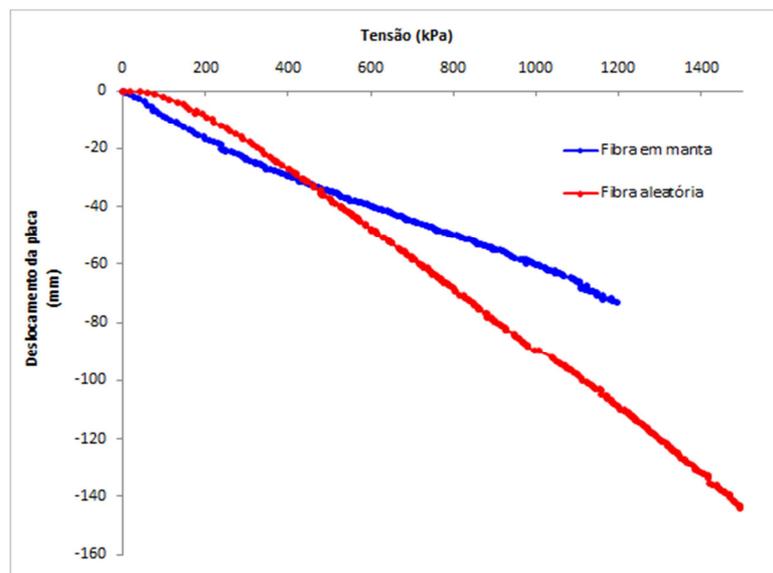
Tensão (kPa)	Recalque (mm)		Redução por fibra aleatória (%)
	Areia úmida sem fibra	Areia úmida com fibra (aleatória)	
450	34,5	31,7	8,1
500	45,4	37,2	18,1
600	65,7	47,8	27,2
700	85,6	58,2	32,0

#### 4.6. Influência da disposição da fibra

Uma vez comprovada que a adição de fibra de coco contribui para a manutenção da resistência da mistura durante um aumento de tensão, é possível investigar qual é a melhor forma para se colocar a fibra de coco no solo.

Neste trabalho, estudaram-se duas disposições de fibra: colocou-se uma manta de fibra na metade de cada camada e as fibras cortadas foram colocadas aleatoriamente, misturando-as com a areia.

A figura 4.43 mostra as curvas tensão-recalque para as duas disposições da fibra:



**Figura 4.43 - Influência da disposição da fibra na areia**

Inicialmente, com o incremento da tensão, a distribuição da fibra aleatória apresenta menores recalques, aproximadamente até uma tensão de 400 kPa, a partir da qual o desempenho das curvas muda de maneira drástica. O reforço com fibra em manta passa a segurar melhor as camadas do solo, distribuindo as tensões e evitando uma queda na resistência da camada, sob o contínuo acréscimo da tensão axial.

É importante notar que na comparação anterior de areia sem reforço e com reforço de fibra aleatória, o ponto de inflexão das curvas foi aproximadamente também na tensão de 400 kPa portanto é possível afirmar que para esta areia, a maior mobilização de fibras começa após desse estágio de tensão.

A tabela 4.3 mostra um comparativo entre os recalques para cada acréscimo de tensão em kPa.

**Tabela 4.3 - Porcentagem de redução do recalque por disposição da fibra**

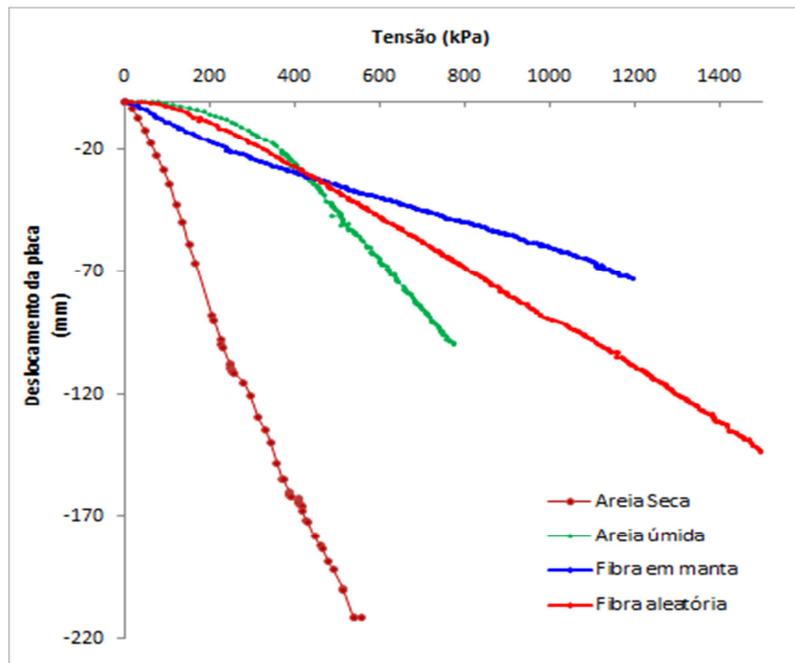
Tensão (kPa)	Recalques (mm)		Redução por fibra aleatória (%)	Redução por fibra em manta (%)
	Areia úmida com fibra em manta	Areia úmida com fibra aleatória		
100	9,0	2,0	77,8	-
200	16,8	9,0	46,4	-
300	24,3	17,6	27,6	-
400	29,5	27,0	8,5	-
500	34,6	37,2	-	7,5
600	39,8	47,8	-	20,1
700	45,0	58,2	-	29,3
800	49,7	68,4	-	37,6
900	55,0	80,4	-	46,2
1000	60,3	89,8	-	48,9
1100	66,2	98,2	-	48,3

Pode-se notar que, para menores valores de tensão, a fibra aleatória diminui melhor os recalques quando comparado com a fibra em manta. Entretanto, para maiores estágios de tensão, a manta de fibra impede maiores recalques redistribuindo as tensões atuantes, podendo atingir até uma diminuição dos recalques da ordem de 50%, quando comparada com o reforço de fibra aleatória.

#### **4.7. Comparação geral entre areia sem e com reforço**

Para obter uma visão em conjunto do comportamento geral da areia segundo cada condição apresentada nas provas de placa carga em verdadeira grandeza, a figura 4.44 apresenta as curvas tensão-recalque de cada ensaio.

Pode-se observar que as curvas tensão-recalque dos ensaios de areia úmida sem reforço e com reforço (em manta e aleatório) coincidem aproximadamente num ponto de tensão após o valor de 400 kPa, portanto é possível afirmar que após esse nível de tensão começa a diminuição dos recalques devido à mobilização das fibras.



**Figura 4.44 - Curvas tensão-recalque de todos os ensaios**

A tabela 4.4 mostra um comparativo entre os recalques para cada acréscimo de tensão em kPa procurando obter o percentagem de redução de recalque segundo o formato de disposição da fibra, comparado com a areia úmida sem reforço a partir da tensão de 450 kPa.

**Tabela 4.4 - Porcentagem de redução do recalque geral**

Tensão (kPa)	Recalques (mm)			Redução por fibra em manta (%)	Redução por fibra aleatória (%)
	Areia úmida sem reforço	Areia úmida com fibra em manta	Areia úmida com fibra aleatória		
450	34,5	32,2	31,7	6,7	8,1
500	45,4	34,6	37,2	23,8	18,1
600	65,7	39,8	47,8	39,4	27,2
700	85,6	45,0	58,2	47,4	32,0
800	105,5*	49,7	68,4	52,9	35,2
900	125,5*	55,0	80,4	56,2	35,9
1000	145,4*	60,3	89,8	58,6	38,3
1100	165,4*	66,2	98,2	60,0	40,6

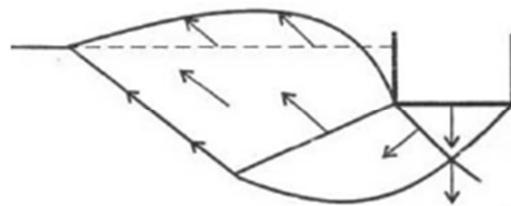
(\*) Valores extrapolados com fins comparativos

Pode-se observar da tabela 4.4 que a disposição da fibra em manta diminui os recalques melhor do que a disposição da fibra aleatória.

#### 4.8. Comparação entre os mecanismos de ruptura

Para uma melhor compreensão do desempenho da areia com relação aos mecanismos de ruptura, é importante entender que, para determinada situação de geometria e carregamento, o tipo de ruptura acontecerá, dependendo da compressibilidade relativa do solo (Vesic, 1963). Segundo o campo de deslocamento (Lopes, 1979), pode-se dizer que:

- (1) A ruptura generalizada é caracterizada pela existência de uma resistência ao cisalhamento limite, bem definida e constituída por uma superfície de deslizamento que vai de uma borda de fundação à superfície do terreno (figura 4.45). Em condições de deformação controlada, constata-se uma redução da carga necessária para produzir deslocamentos. Após a ruptura e durante o processo de carregamento, registra-se um levantamento do solo em torno da fundação. O campo de deslocamento da ruptura generalizada não foi exibido por nenhum ensaio.



**Figura 4.45 - Campo de deslocamento da ruptura generalizada**

- (2) A ruptura localizada é caracterizada por um modelo apenas bem definido imediatamente abaixo da fundação (figura 4.46) e consiste em uma cunha e superfícies de deslizamento que se iniciam junto às bordas da fundação, com a visível tendência de empolamento do solo ao redor da fundação, depois de considerável deslocamento vertical. No entanto, a compressão vertical sob a fundação é significativa e as superfícies de deslizamento terminam dentro do maciço, mobilizando a resistência de camadas mais profundas sem atingir a superfície do terreno. Então, somente depois de um deslocamento vertical apreciável, as superfícies de deslizamento poderão tocar a superfície do terreno.



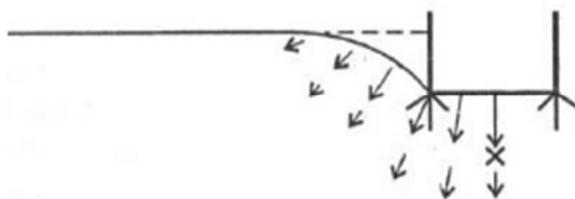
**Figura 4.46 - Campo de deslocamento da ruptura localizada**

Esse campo de deslocamento foi encontrado no ensaio 2, com areia úmida, como se mostra na figura 4.47 e também apresentado nas leituras dos transdutores de deslocamento 1 e 2, mostrados na figura 4.16.



**Figura 4.47 - Campo de deslocamento do ensaio 2 (areia úmida)**

- (3) A ruptura por punção é caracterizada por um mecanismo de difícil observação (figura 4.48), em que o movimento vertical da fundação é acompanhado pela compressão do solo, imediatamente abaixo, e a penetração da fundação é possibilitada pelo cisalhamento vertical em torno do perímetro da fundação, sendo que o solo fora da área, praticamente, não participa do processo.



**Figura 4.48 - Campos de deslocamento da ruptura por punção**

Esse campo de deslocamento foi apresentado por ambos os ensaios úmidos com adição de fibra como se mostra na figura 4.49, segundo registro dos transdutores de deslocamento dos ensaios 3 e 4, como mostram as figuras 4.23 e 4.31, o que foi verificado, também, de forma visual pelas exumações subsequentes.



**Figura 4.49 - Campo de deslocamento do ensaio 4 (fibra aleatória)**

O intertravamento da areia com a fibra produz um acréscimo de resistência ao deslocamento. Portanto, a tensão aplicada pode ser dissipada e transmitida na massa do compósito, prevenindo uma ruptura localizada por uma concentração de tensões no ponto de aplicação da carga.

As figuras 4.50, 4.51 e 4.52 apresentam, em detalhe, os mecanismos de ruptura obtidos para as camadas de areia sem fibra, areia com fibra em manta e com fibra aleatória, as três empregando fibras com 50 mm de comprimento e todas as camadas com uma densidade relativa de 50%, ao finalizar cada ensaio em uma vista superior.



**Figura 4.50 - Mecanismo de ruptura localizada da areia sem fibra**



**Figura 4.51 - Mecanismo de ruptura por punção da areia com fibra em manta**



**Figura 4.52 - Mecanismo de ruptura por punção da areia com fibra aleatória**

Como pôde ser visto na figura 4.50, as tensões geradas durante o carregamento das camadas de areia sem fibra causaram a formação de trincas perpendiculares à placa, que partem das fissuras circulares para o exterior.

Tanto na figura 4.51, como na 4.52, pode-se ver que a adição de fibras, qual seja sua distribuição na matriz arenosa, contribui para um acréscimo de resistência na mistura, o que é verificado nas curvas de tensão-recalque e na mudança do mecanismo de ruptura.

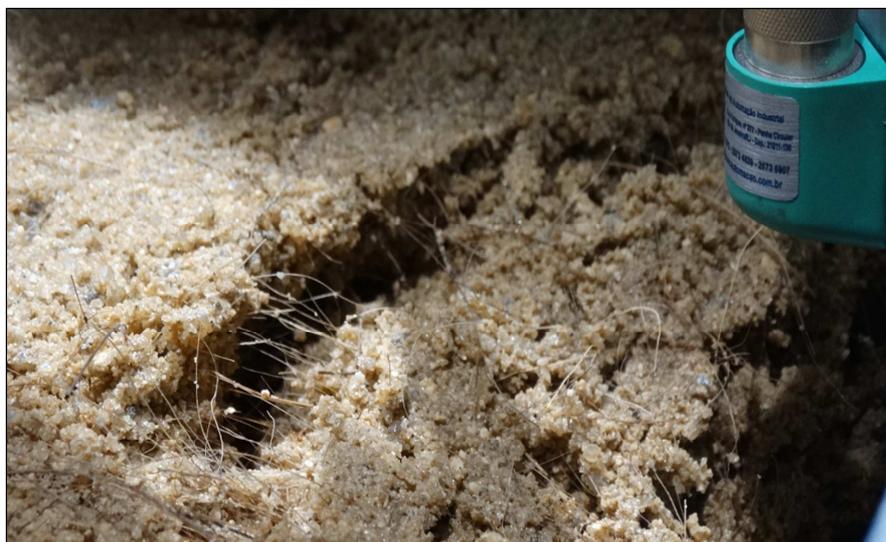
As trincas geradas nos ensaios com adição de fibras concentram-se ao redor da placa, mantendo a forma circular desta, devido às tensões repartidas uniformemente em todos os sentidos, gerando uma zona de cisalhamento pelo acréscimo das tensões aplicadas.

A diferença entre a quantidade de fissuras dos ensaios 3 e 4 ocorre porque, no caso do ensaio 3, as tensões são captadas previamente pela manta de fibra que

atua como uma membrana que diminui o recalque, apesar de não evitar a fissuração superficial. Portanto, pode-se notar uma maior quantidade de fissuras, enquanto no caso do ensaio 4, as fibras colocadas aleatoriamente inibem a propagação de fissuras, por isso, na superfície, pode-se ver que, para uma maior tensão (1490 kPa) no ensaio com fibra aleatória, as fissuras aparecem em menor quantidade do que no ensaio com fibra em manta (1190 kPa).

As fibras trabalham no estado de pós-fissuração quando o solo não pode mais resistir a cargas. As fibras começam a trabalhar a tração, segurando os grãos do solo, impedindo a propagação das fissuras.

Na figura 4.53 se mostra como durante o ensaio as fibras começam segurando o solo além de que aconteceu a ruptura por punção.



**Figura 4.53 - Ação das fibras na trinca de tração**

Finalmente, levando-se em consideração os referidos comportamentos, podemos determinar que o formato de colocação da fibra tem duas qualidades para melhorar um solo de fundação. Além de cumprir a função de reforço, a colocação da fibra misturada aleatoriamente com a areia evita a propagação de fissuras que podem, com o tempo, tornarem-se maiores por conta do efeito da erosão eólica ou fluvial. A colocação de fibra em manta, por sua vez, é mais efetiva para impedir maiores recalques em uma fundação submetida a grandes carregamentos.

#### 4.9. Comparação dos resultados com base na literatura existente

Dos estudos apresentados na revisão bibliográfica que pesquisaram sobre o reforço de solo com fibras utilizando o ensaio de prova de carga em placa, a pesquisas feitas por Casagrande (2005) e Donato (2007) são aquelas que têm as maiores semelhanças com o presente trabalho.

Antes de fazer comparações entre os resultados dos estudos mencionados, é importante ter primeiramente presente quais são os pontos de diferença entre eles, para originar conclusões acertadas.

Assumindo que todos os estudos satisfizeram os requisitos de calibração dos equipamentos e cumpriram adequadamente com os métodos de ensaio, as principais variáveis que influem nos resultados de uma pesquisa experimental sobre reforço de solo são: (1) tipo de equipamento; (2) tipo de reforço e (3) tipo de solo utilizado, deste modo, as tabelas 4.5, 4.6 e 4.7 mostram as principais características dos estudos mencionados comparando-as com o presente trabalho.

**Tabela 4.5 - Características do equipamento**

Estudo	Dimensões da Caixa de Ensaio	Diâmetro de Placa (m)	Sistema de reação (kN)
Casagrande (2005)	1,9 x 1,9 x 0,8	0,3	250
Donato (2007)	1,9 x 1,9 x 0,8	0,3	250
Sotomayor (2014)	1,4 x 1,4 x 1,2	0,3	250

**Tabela 4.6 - Características do reforço**

Estudo	Tipo de Fibra	Comprimento da Fibra (mm)	Porcentagem de fibra (%)
Casagrande (2005)	polipropileno	24	0,5
Donato (2007)	polipropileno	50	0,5
Sotomayor (2014)	coco	50	0,5

Tabela 4.7 - Características do solo

Estudo	Tipo de Solo	Teor de Umidade (%)	Espessura das camadas (m)	Densidade Relativa (%)
Casagrande (2005)	areia fina	10	0,1	50
Donato (2007)	areia fina	10	0,1	50
Sotomayor (2014)	areia grossa	10	0,1	50

Com essa base para a avaliação, apresenta-se a figura 4.54 que mostra as curvas tensão-recalque da areia sem reforço e com reforço dos estudos citados anteriormente.

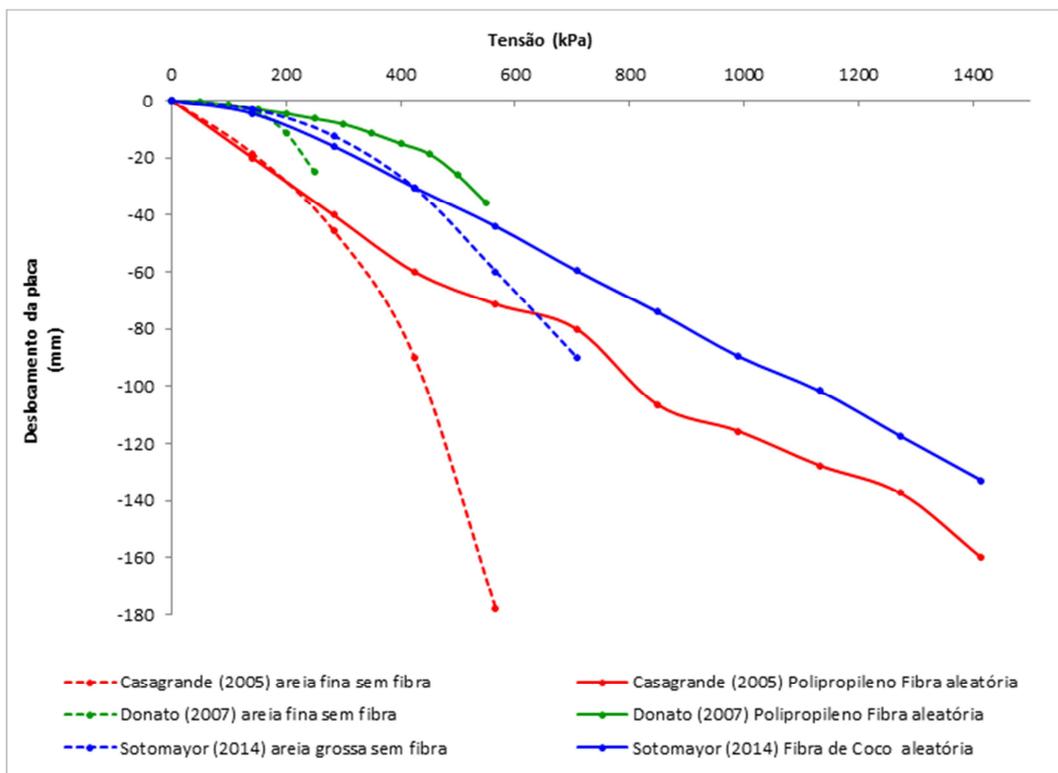


Figura 4.54 - Comparação com resultados de outros estudos

Pode-se notar que em todos os estudos a adição de fibra aleatoriamente à areia ocasiona uma redução aproximada de 50% dos recalques apresentados quando comparado sem reforço.

A tendência das curvas tensão-recalque quando submetidas a grandes carregamentos é similar, observando que a diferença entre as curvas pode ser

produzida pelo efeito do material, a areia grossa opõe mais resistência ao deslocamento do que a areia fina, de outro lado, o comprimento de fibras utilizado por Casagrande (2005) de 24 mm é menor do que o utilizado no presente trabalho, fato que, sendo comparado com as curvas apresentadas por Donato (2007) que utilizou também areia fina demonstra que o comprimento da fibra é um fator preponderante no incremento da resistência ao cisalhamento.

Os mecanismos de ruptura localizada para a areia sem reforço e ruptura por puncionamento para a areia com reforço de fibra de coco corroboram com os resultados obtidos por Casagrande (2005) e Donato (2007) os quais apresentaram a mesma resposta reforçando a areia com fibras de polipropileno.

Pelos resultados obtidos é possível afiançar a tese de que a fibra de coco é um material que pode competir com as fibras sintéticas para determinados níveis de carregamento como os apresentados nesta pesquisa.