

## **4 Apresentação e análise de Resultados**

### **4.1. Considerações iniciais**

O presente capítulo tem por finalidade apresentar e analisar os resultados dos ensaios de carregamento cíclico no modelo físico de verdadeira grandeza, desenvolvidos para quatro diferentes situações da estrutura do pavimento consideradas no programa experimental. O objetivo é verificar as diferenças do comportamento mecânico entre uma estrutura não reforçada e a reforçada com geogrelha.

Também são apresentadas as medições e/ou gráficos fornecidos pela instrumentação montada no modelo físico, com monitoramento das células de carga, dos tensiômetros de alta capacidade (TAC) e dos refletômetros no domínio do tempo (TDR).

### **4.2. Ensaio de carregamento cíclico**

O carregamento cíclico aplicado foi de 26,96 kN sobre uma placa rígida de 25,05 cm de diâmetro resultando numa pressão de contato de 550 kPa, que se compara à pressão de uma das rodas de um eixo-padrão de rodas duplas comumente empregado nas análises de tráfego do método de dimensionamento tradicional. Foram realizadas pelo menos 35.000 aplicações de carga com frequência de 1 Hz (0,1 s de atuação do carregamento por 0,9 s de repouso) para as quatro etapas de ensaios desenvolvidos no tanque teste. Para fins de comparação foram: um ensaio no pavimento não reforçado e outro reforçado com geogrelha para a condição do subleito compactado na umidade ótima; um ensaio reforçado com geogrelha e outro não reforçado após inundação do subleito.

Foram considerados somente 35.000 ciclos de carga para avaliação do desempenho da geogrelha nestes gráficos, mas houve um grande número de solicitações durante vários testes realizados e ajustes, não contabilizados neste

resumo do experimento. Embora sabendo que a geogrelha é mais eficiente na redução da deformação permanente e o ideal seria relatar o resultado com um número maior de ciclos, isto não foi possível por problemas diversos que atrasaram o cronograma deste estudo.

O desenvolvimento dos deslocamentos superficiais pela aplicação das cargas dinâmicas no pavimento foi monitorado pelos LVDTs, como foi mencionado no Capítulo 3, cujas medidas foram os parâmetros de comparação entre a estrutura de pavimento com e sem reforço.

Para todos os ensaios realizados, a estrutura do pavimento é constituída de uma base de brita de 20 cm sobreposta a um subleito de 100 cm de espessura, para o caso dos ensaios sobre o pavimento sem reforço. Para os ensaios sobre o pavimento com reforço utiliza-se a mesma estrutura com a inserção da geogrelha na interface subleito-base. A impermeabilização com a emulsão asfáltica foi repetida em todas as situações dos ensaios com a finalidade de evitar a perda de umidade pela superfície exposta da base.

#### **4.2.1.**

#### **Deslocamentos verticais superficiais sobre o subleito compactado na umidade ótima**

##### **4.2.1.1.**

##### **Ensaio sem a utilização de geogrelha**

Este ensaio foi desenvolvido quando a estrutura de suporte dos LVDTs se encontrava presa ao teto do laboratório como foi mencionado no item 3.3.5.2. É necessário enfatizar este ponto, porque o efeito de dilatação do teto influenciou nos valores dos deslocamentos registrados pelos LVDTs durante a realização do ensaio. Infelizmente o problema só foi percebido durante a realização do ensaio com a utilização do reforço.

O ensaio teve início às 12:00 horas, quando a temperatura do meio ambiente estava elevada, aproximadamente no ciclo 6.000 já tinha decorrido duas horas de ensaio e a temperatura começava a diminuir, fazendo com que o teto dilatado voltasse para a sua posição inicial, como pode-se observar claramente na Figura 4.2 que mostra o desenvolvimento dos deslocamentos superficiais plásticos, em que foram registradas leituras de deformação decorrentes da carga aplicada com influência da ocorrida no teto.

A Figura 4.1 mostra a progressão dos deslocamentos verticais elásticos com o número de ciclos de carga, para o caso da estrutura sem reforço e com subleito compactado na umidade ótima, registrados somente pelo LVDT 1, uma vez que o software DefTan que registra as leituras dos LVDTs só estava configurado para o registro do primeiro LVDT colocado sobre a placa a 3,5 cm do ponto de aplicação da carga.

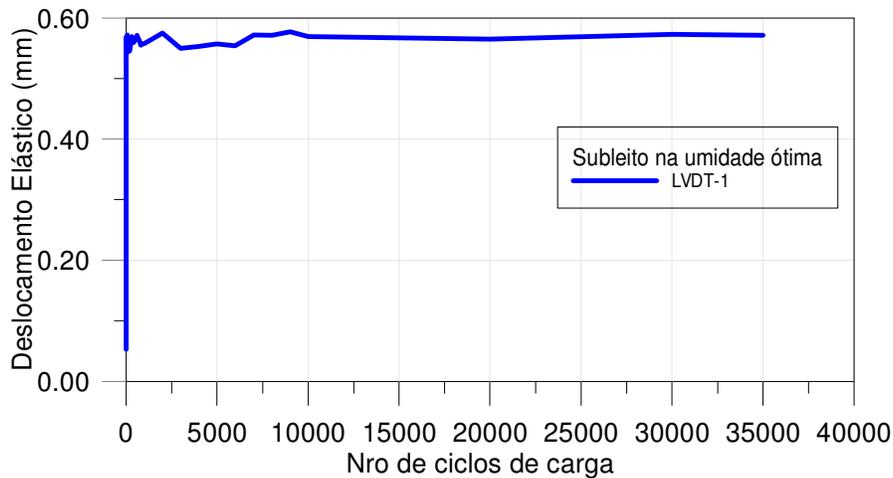


Figura 4.1 – Desenvolvimento dos deslocamentos superficiais elásticos no primeiro ensaio.

Pode-se observar que, durante o desenvolvimento da aplicação de carga, o deslocamento elástico máximo alcançou 0,57 mm de deformação para os 35.000 ciclos de carga aplicados. Para este ensaio não foi possível desenvolver a bacia de deflexão pela ausência de mais pontos de medição com registro.

Apesar do problema da referência (dilatação do teto já descrito), os resultados obtidos neste ensaio apresentam coerência, em ordem de grandeza, quando comparados com os resultados obtidos por Kakuda (2010) e Silva (2009).

Para tensões aplicadas em condições similares às desta pesquisa, Kakuda (2010) analisou uma seção de pavimento composta por um subleito cujo solo, segundo a classificação MCT foi definido como não laterítico siltoso (NS') compactado no teor de umidade de 25,7% e o seu valor de CBR foi de 8% compactado na umidade ótima, uma base de mistura solo-brita (30%+70%) de comportamento laterítico com CBR igual a 190%, com espessuras de 50 e 20 cm, respectivamente, carregada ciclicamente sobre uma placa de 30 cm de diâmetro, e obteve uma deflexão máxima de 1,1 mm para 400.000 ciclos de carga. Comparando as deflexões máximas de ambos trabalhos, pode-se concluir que o

menor teor de umidade (17%) do subleito da presente pesquisa influenciou no valor de deflexão que foi menor que a obtida por Kakuda.

Silva (2009) ensaiou a estrutura de pavimento mencionada no item 2.6.1, e obteve uma deflexão máxima de 0,23 mm, valor determinado por interpolação para uma pressão de 550 kPa, sendo que a melhor qualidade o subleito (CBR = 12%) e a presença de uma camada de sub-base na estrutura do pavimento daquele experimento diminuíram as deflexões.

A Figura 4.2 mostra os deslocamentos plásticos ou permanentes ocorridos durante a realização do ensaio e determinados na superfície do pavimento sob a placa de carregamento. Estes resultados tiveram influência determinante do problema do teto e não podem ser considerados coerentes porque não tem como uma deformação plástica diminuir com o número de ciclos, de forma como o experimento foi realizado.

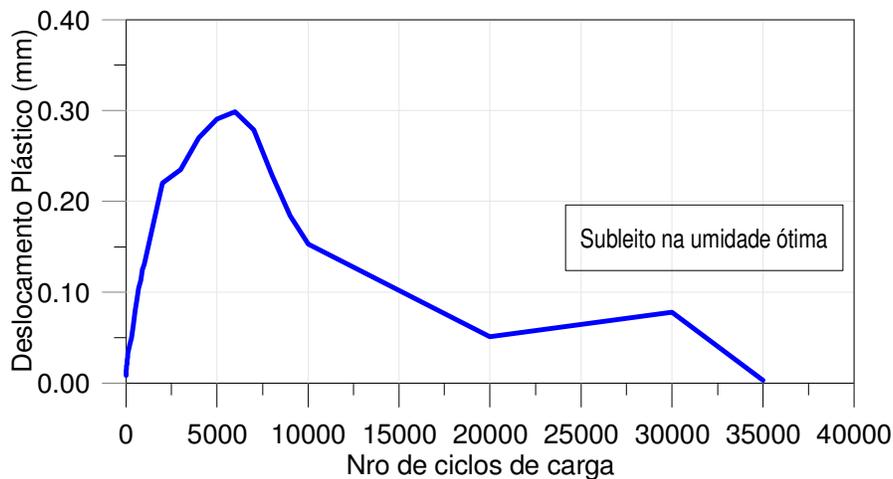


Figura 4.2 - Desenvolvimento dos deslocamentos superficiais plásticos no primeiro ensaio.

Como pode-se observar na Figura 4.2, a deformação superficial plástica atingiu seu maior valor de 0,30 mm no ciclo de carga número 6000, a partir do qual se experimentou uma queda nos valores dos deslocamentos, claramente pode-se perceber que isto não deve ter acontecido porque as deformações plásticas sempre tendem a aumentar e não a diminuir.

#### 4.2.1.2.

#### Ensaio com a utilização de geogrelha na interface subleito-base

Este segundo ensaio foi realizado com a inserção da geogrelha de polipropileno (Fornit J600) como elemento de reforço, posicionada na interface subleito-base. Para realizar o segundo ensaio, foi retirada a camada de base, do primeiro ensaio, para colocar o material de reforço devidamente ancorado ao solo do subleito e depois compactada uma nova camada de base com o mesmo procedimento de compactação descrito no item 3.4.1.2.

Durante a realização deste ensaio foi observada a influência da deformação do teto na leitura dos LVDTs, o que implicou na necessidade nesta etapa a mudança do sistema de fixação de suporte dos LVDTs, como foi explicado no item 3.3.5.2, garantindo que o novo sistema de fixação não interferisse mais nas leituras. Além disso, também foi corrigido o software DefTan para registrar os deslocamentos verticais superficiais dos quatro LVDTs utilizados nesta pesquisa.

Os LVDTs 1 e 2 foram instalados a 3,5 cm do ponto de aplicação de carga, um de cada lado sobre a placa, e esses foram os instrumentos utilizados para obter os valores máximos da deformação produzida pela aplicação do carregamento, os LVDTs 3 e 4 foram colocados a 37,5 e 58,0 cm, respectivamente, do ponto de aplicação de carga.

A Figura 4.3 mostra a progressão dos deslocamentos superficiais elásticos em função do número de ciclos de carga para o caso da estrutura com reforço em que o subleito encontrava-se na umidade ótima de compactação.

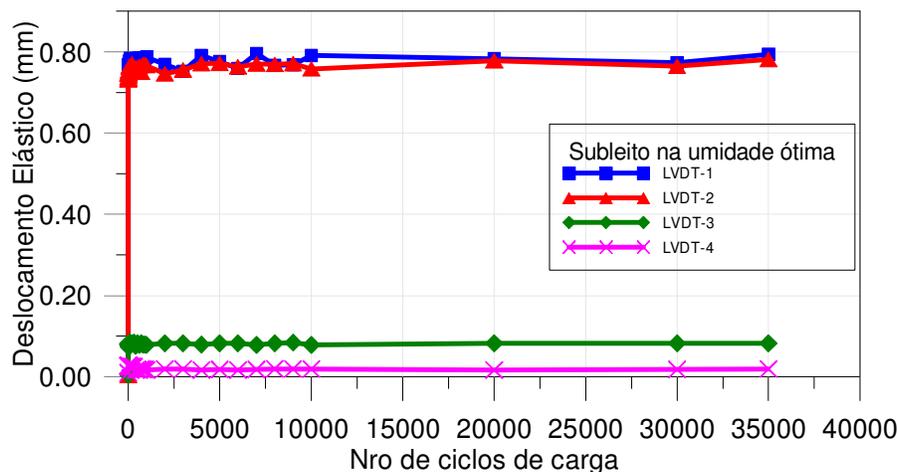


Figura 4.3 - Desenvolvimento dos deslocamentos superficiais elásticos no segundo ensaio.

Analisando a Figura 4.3 pode-se observar que o deslocamento superficial vertical elástico máximo é de 0,80 mm obtido pelo LVDT 1 e que os dois últimos LVDTs mediram deslocamentos na faixa de 0,08 e 0,03mm.

É importante também observar que o LVDT 3 registrou maiores deformações em comparação com o LVDT 4, porque o 3 estava mais próximo do ponto de aplicação de carga.

Para as mesmas condições de tensões aplicadas e propriedades mecânicas da geogrelha similar à utilizada nesta pesquisa, com seção de pavimento descrita no item 4.2.1.1, no trabalho de Kakuda (2010) pode-se verificar que o valor da deflexão obtida foi de 0,9 mm após a aplicação de 400.000 ciclos de carga. Existe uma pequena diferença entre as deflexões do presente trabalho (0,8 mm), mas percebe-se que a utilização do mesmo tipo de material de reforço gerou deformações similares visto que os solos do subleito de ambas as pesquisas são classificados como não lateríticos siltosos (NS'). Consideradas as diferenças de modelo físico e das configurações de aplicação das cargas, a diferença pode ser considerada pequena e portanto, conclui-se que a utilização da geogrelha gerou deflexões parecidas para os dois estudos.

Como neste ensaio foram considerados os dados registrados pelos 4 LVDTs, foi possível obter a bacia de deflexão, conforme mostrada na Figura 4.4. Para tanto, foram escolhidos cinco pontos da curva de deslocamento elástico correspondentes a números de ciclos deste ensaio (Figura 4.3): 100 ciclos, 600 ciclos, 5.000 ciclos, 20.000 ciclos e 35.000 ciclos de carregamento. Mostra-se que as deflexões estão praticamente coincidentes.

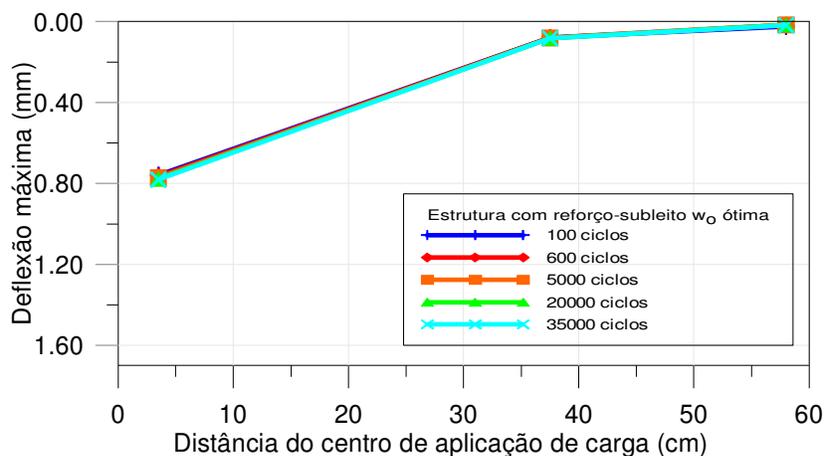


Figura 4.4 – Bacia de deslocamentos verticais em função do número de ciclos de carga – ensaio reforçado com geogrelha.

Analisando a Figura 4.4 pode-se observar que o desenvolvimento das deflexões apresenta quase o mesmo valor de deflexão para cada número de ciclos de carga escolhidos, existindo uma convergência para um valor único, a partir do qual o processo estabiliza-se. É preciso comentar que esta aquisição de dados foi realizada após 263.300 ciclos de carga, resultantes de inúmeros testes feitos ao longo do ajuste dos sistemas de aplicação de carga e de referência, que produziram um acomodamento do subleito.

A Figura 4.5 mostra os deslocamentos plásticos ou permanentes desenvolvidos durante a realização do ensaio, considerando-se apenas os resultados dos deslocamentos obtidos na vertical da aplicação do carregamento.

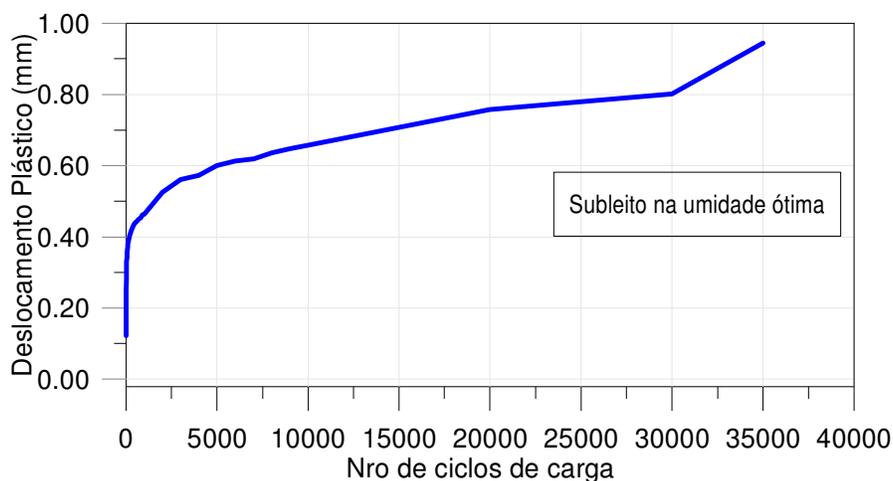


Figura 4.5 - Desenvolvimento dos deslocamentos superficiais plásticos no segundo ensaio reforçado com geogrelha.

Como se pode observar na Figura 4.5, o deslocamento superficial vertical plástico máximo foi de 0,94 mm após a aplicação de 35.000 ciclos de carga com tendência a incrementar.

Não será feita uma análise comparativa entre os dois experimentos desta pesquisa (sem e com reforço na condição de umidade ótima do subleito) tendo em vista as questões de referência dos deslocamentos já comentadas.

Antunes (2008) e Góngora (2011) desenvolveram pesquisas utilizando geossintéticos como material de reforço de camada de base do pavimento em equipamentos de grandes dimensões. O parâmetro de medição de benefício do uso de geossintéticos foi avaliar uma estrutura de pavimento reforçada e não reforçada para ambos trabalhos, registrando-se deslocamentos através de LVDTs para ambas condições do pavimento. Os ensaios foram realizados adotando-se como

critério de parada deslocamento vertical permanente superficial (análoga a uma trilha de roda) de 25 mm, ou seja, foi imposto ao pavimento o carregamento cíclico até que ele alcançasse esse deslocamento permanente na superfície. Na condição da estrutura do pavimento não reforçada e reforçada compactada na umidade ótima ambos pesquisadores obtiveram resultados que são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Características dos ensaios realizados por Antunes (2009) e Góngora (2011) com utilização de geossintéticos como material de reforço.

Pesquisas	Estrutura do pavimento	Espessura (cm)	Nº de ciclos		Reforço	
			Estrutura	Estrutura	Tipo	Abertura da malha (mm)
			sem reforço	com reforço		
Antunes (2008)	Subleito	50	30.720	282.600	Geogrelha tipo Fornit J600	40 x 40
	Base (Brita)	20		85.044	Geotêxtil tecido	
Góngora (2011)	Subleito	30	1.630	24.064	Geogrelha	30 x 30
	Aterro (Brita)	23		33.068	Tipo Fortrac 200	20 x 20
				24.107		40 x 40

É importante mencionar que Góngora utilizou além da brita como material de base, resíduos de construção de demolição reciclados (RCD-R) sendo utilizados nesta Tabela 4.1 somente os ensaios onde a brita foi parte da camada do aterro (base) pela similaridade com o material de base deste trabalho.

Para ambos trabalhos a eficiência da geogrelha foi definido como a razão entre o número de repetições (Nr) de carga necessárias para que a estrada reforçada alcance um afundamento de 25 mm e o número de repetições (Nu) de carga para que a estrutura não reforçada também atinja o mesmo afundamento.

Góngora (2011) quantificou o fator de eficiência da geogrelha de abertura da malha de 30 x 30, 20 x 20 e 40 x 40 mm sendo 15, 20 e 15, respectivamente, o valor de eficiência delas, resultando que, a geogrelha de 20 x 20 mm foi a que apresentou melhor desempenho pelo maior número de ciclos que suportou.

Para Antunes (2008), o fator de eficiência fornecido pela geogrelha e geotêxtil foi de 9,2 e 2,8, respectivamente, observando-se que a geogrelha foi mais eficaz no aumento da vida útil do pavimento.

Pode-se concluir que o mesmo tipo de reforço deste estudo, utilizados nas pesquisas citadas, gera efeitos positivos no comportamento mecânico do

pavimento sob o ponto de vista da deformação plástica. O reforço contribuiu conferindo maior rigidez lateral à camada do solo de base.

Nesta pesquisa o número de ciclos de carregamento foi muito menor do que o de Antunes, porém, indiretamente, este benefício foi observado quando na compactação da camada da base com a geogrelha inserida resultou numa densidade maior que a obtida na compactação sem a geogrelha.

#### 4.2.2.

#### **Deslocamentos verticais superficiais após a inundação do subleito**

Esta terceira etapa do experimento foi realizada após o término da etapa apresentada no item 4.2.1.2, mantendo-se a estrutura de pavimento inalterada e inundando-se o subleito por ascensão capilar. O avanço da franja capilar, como era de se esperar pelo coeficiente de permeabilidade obtido para o solo do subleito, foi lento, o que fez com que fosse necessário esperar um período de 26 dias após o início do umedecimento do subleito para a realização do respectivo ensaio, período que garantiu o avanço total da franja capilar ao longo do perfil do subleito. Este avanço foi monitorado pelas leituras diárias feitas pela instrumentação de umidade (TDRs) que indicavam o valor da umidade em cada camada de 20 cm do subleito conseguindo-se os valores finais da umidade após o avanço total da franja capilar. Esses valores permitiram calcular o valor do grau de saturação de cada camada do subleito. Com a umidade medida em cada camada ( $w$ ) registrada pelo TDR correspondente, o índice de vazios do solo ( $e$ ) e a massa específica real dos grãos ( $G_s$ ) do solo, foi possível obter o grau de saturação de cada camada através da equação 4.1:

$$S(\%) = \frac{w(\%)*G_s}{e} \quad \text{Equação 4.1}$$

O índice de vazios do solo foi calculado através da equação 4.2:

$$e = \frac{G_s}{\gamma_d} - 1 \quad \text{Equação 4.2}$$

Onde:

$G_s$  : massa específica real dos grãos,

$\gamma_d$  : massa específica aparente seca.

Os valores da umidade obtidos pelos TDRs para cada camada de 20 cm do subleito são mostrados na Figura 4.6.

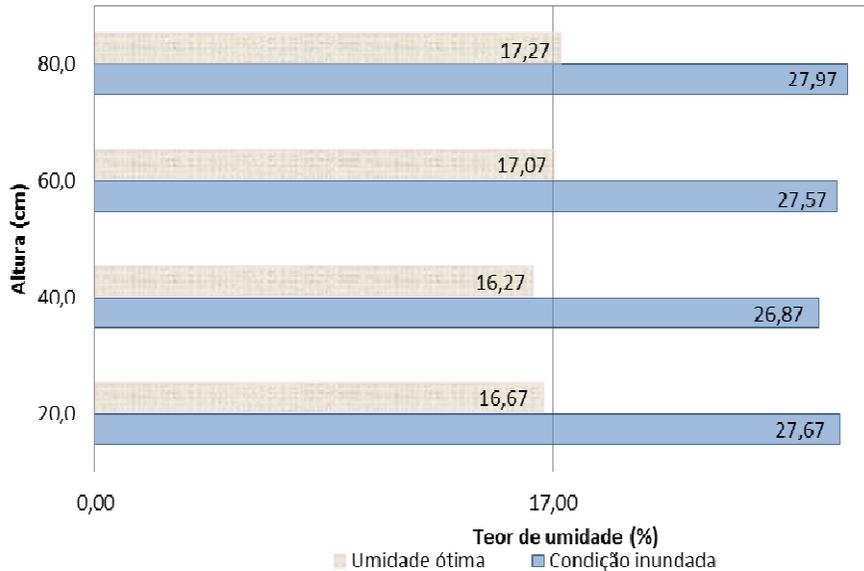


Figura 4.6 – Valores de umidade nas camadas do subleito na umidade ótima e após a sua inundação.

O avanço total da franja capilar foi controlado pelo medidor de nível d'água e sua estabilização foi definida como o momento que, após três dias consecutivos de medições sucessivas, não houve alteração significativa ( $\pm 0,5\%$ ) da umidade ao longo do perfil do subleito do pavimento.

Analisando a umidade ao longo do subleito, apresentado na Figura 4.6, observa-se que as umidades nas camadas do subleito apresentam valores próximos entre si garantindo o avanço total da franja capilar. Tomando-se a média da umidade fornecida pelas sondas, igual a 27,5%, pode-se observar que ocorreu grande variação da umidade a partir da umidade de compactação, igual a 17,3%, com uma diferença de 10,2%.

Silva (2009) trabalhou com seis posições de nível d'água, através do avanço e descida da franja capilar e para a condição da estrutura do pavimento até a camada de base (sem revestimento) esperou para o total avanço da franja capilar de cada nível d'água entre 15 a 20 dias, tempo menor do que o utilizado nesta pesquisa, visto que o solo do subleito da pesquisa citada apresentava um coeficiente de permeabilidade maior.

#### 4.2.2.1.

#### Ensaio com a utilização de geogrelha na interface subleito-base

A Figura 4.7 apresenta os deslocamentos verticais superficiais elásticos registrados pelos quatro LVDTs para a estrutura do pavimento com reforço após a inundação do subleito.

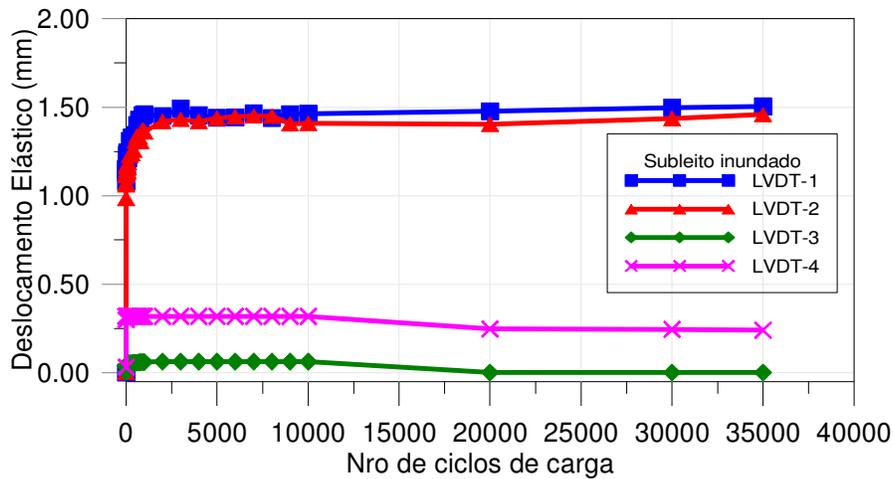


Figura 4.7 – Desenvolvimento dos deslocamentos superficiais elásticos no terceiro ensaio desta pesquisa.

Analisando-se a Figura 4.7, pode-se concluir que o deslocamento elástico máximo registrado na vertical foi de 1,46 mm após 35.000 ciclos de aplicação de carga. Pode-se observar também que as leituras registradas a 58 cm (LVDT 4) de distância da aplicação do carregamento apresentaram valores de leituras maiores que as registradas a 37,5 cm (LVDT 3), por algum problema não identificado durante o ensaio, visto que o LVDT 4 deveria registrar valores menores dos deslocamentos por encontrar-se mais afastado do centro de aplicação de carga.

Como neste ensaio foram registrados os dados dos 4 LVDTs, foi possível obter a bacia de deflexão, conforme mostra a Figura 4.8. Para tanto, foram escolhidos cinco instantes da curva de deslocamento elástico correspondentes a número de ciclos deste ensaio (Figura 4.7): 100 ciclos, 600 ciclos, 5.000 ciclos, 20.000 ciclos e 35.000 ciclos de carregamento.

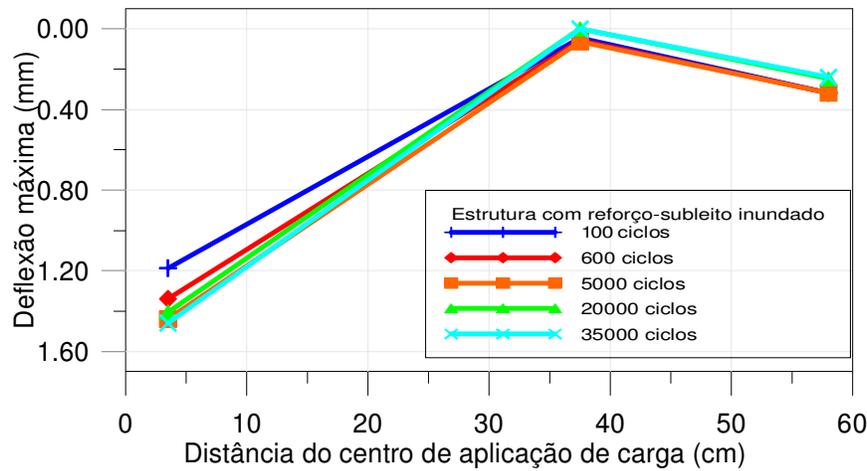


Figura 4.8 – Bacia de deslocamentos verticais em função do número de ciclos de carga – ensaio reforçado com geogrelha.

Analisando-se as bacias de deflexão apresentadas na Figura 4.8, observa-se que as deflexões máximas sob a carga apresentam crescimento com o aumento do número de ciclos, provavelmente pelo excesso de água no solo.

Também, considerando-se que os valores de deflexões para distâncias da aplicação de carga a 37,5 cm são reduzidas em relação à máxima distância, pode-se supor que a geogrelha está sendo solicitada fora da área carregada, em até duas vezes aproximadamente o raio da placa sobre a qual foi aplicado o carregamento cíclico, considerando-se que a resistência e rigidez à tração da geogrelha estejam contribuindo na redução das deflexões obtidas até este ponto.

Comparando-se as deflexões máximas obtidas na estrutura do pavimento reforçado para as condições do subleito compactado na umidade ótima e após sua inundação de 0,80 e 1,46 mm, respectivamente, a segunda é 1,8 vezes maior que a primeira, fato decorrente da diminuição da rigidez do subleito.

Os deslocamentos plásticos ou permanentes desenvolvidos durante a realização do ensaio foram determinados na superfície do pavimento sob a placa de carregamento. A Figura 4.9 apresenta o desenvolvimento dos deslocamentos como o número de ciclos considerando-se apenas os resultados obtidos na vertical da aplicação do carregamento.

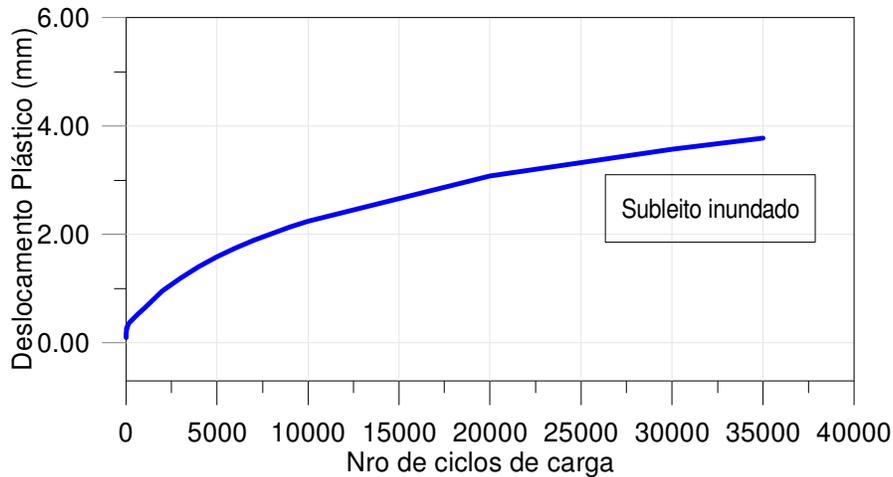


Figura 4.9 – Desenvolvimento dos deslocamentos superficiais plásticos no terceiro ensaio – reforço e inundação do subleito.

Como pode se observar na Figura 4.9, o deslocamento superficial vertical plástico máximo foi de 3,77 mm, após a aplicação dos 35.000 ciclos com tendência a incrementar.

Comparando-se os deslocamentos máximos obtidos na estrutura do pavimento reforçado para as condições do subleito compactado na umidade ótima e após sua inundação de 0,94 e 3,77 mm, respectivamente, pode-se observar que a segunda condição é 4 vezes maior que a primeira, fato decorrente da diminuição da rigidez do subleito.

Conclui-se que a variação da umidade do subleito proporcionou aumento tanto nos deslocamentos elásticos quanto nos deslocamentos plásticos, sendo esse aumento proporcionado pela perda de rigidez do subleito devido à elevação do teor de umidade.

#### 4.2.2.2. Ensaio sem a utilização de geogrelha

Para a realização desta etapa de ensaio foi retirada a geogrelha inserida na interface do subleito-base. Para isso foi necessário rebaixar a altura da franja capilar, através do sistema de drenagem do tanque (ralos posicionados no fundo do tanque protegidos com uma membrana que evitam o entupimento deles pelos finos do solo),

O rebaixamento da franja capilar do subleito foi controlado através do medidor de nível d'água e também pelas leituras diárias feitas pelos TDRs até

uma altura que permitisse retirar a camada de base e a geogrelha para novamente compor a camada de base com a brita. O tempo transcorrido para atingir essa altura foi de 5 dias. Em seguida, foi recomposta a estrutura do pavimento com os 20 cm da camada de base e sua respectiva impermeabilização com emulsão asfáltica RR-1C, para evitar a perda da umidade dos materiais.

Após reconstruída a estrutura de pavimento foi feita a introdução de água de forma a elevar a altura capilar que havia sido rebaixada. No entanto, esta etapa de inundação do subleito até alcançar a mesma franja capilar anterior demorou mais tempo que na primeira etapa, 17 dias adicionais. Esse fato pode ter acontecido por causa da aplicação de carga na condição submersa do subleito com reforço que pode ter diminuído o número de vazios do solo, dificultando o avanço da franja capilar, tendo em vista que o solo já apresentava baixo coeficiente de permeabilidade.

A Figura 4.10 e a Figura 4.12 apresentam os deslocamentos verticais superficiais elásticos e plásticos registrados pelos LVDTs para a estrutura do pavimento sem reforço após a inundação do subleito.

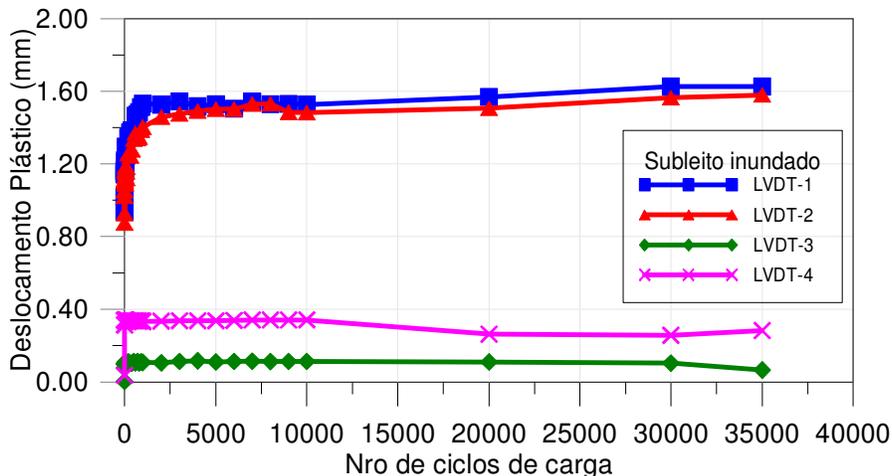


Figura 4.10 - Desenvolvimento dos deslocamentos superficiais elásticos no quarto ensaio – sem reforço e subleito inundado.

Analisando-se a Figura 4.10, pode-se concluir que o deslocamento vertical elástico máximo é de 1,63 mm após 35.000 ciclos de carga.

Na bibliografia revista não se encontrou pesquisas brasileiras com características similares às deste trabalho, além do trabalho de Kakuda (2010), que envolvam a utilização de geossintéticos como material de reforço em estruturas de pavimentos e mais ainda com uma situação de umidade de saturação do subleito. Tomando os resultados deste pesquisador para fins comparativos, na condição da estrutura com e sem reforço, após 60.000 e 100.000 ciclos de carga, respectivamente, as deflexões máximas foram de 1,6 mm e 2,2 mm. Pode-se notar que a deflexão com a utilização de reforço apresenta um valor próximo ao obtido na presente pesquisa. No entanto, para o caso sem a utilização do reforço, a diferença entre as deflexões é maior.

Conclui-se que, para ambas as pesquisas, quando a geogrelha é parte da estrutura do pavimento, as diferenças entre os valores das deflexões são da ordem de 0,1 mm. No entanto, analisando o pavimento sem reforço e na condição inundada do subleito esta diferença aumenta até 5,7 vezes, o que pode levar a conclusão de que a utilização da geogrelha gerou deflexões da mesma ordem de grandeza obtidas em ambos os trabalhos.

As bacias de deflexão, conforme mostradas na Figura 4.11, foram escolhidas para cinco pontos da curva de deslocamento elástico vs  $N^o$  de ciclos deste ensaio (Figura 4.10): 100 ciclos, 600 ciclos, 5.000 ciclos, 20.000 ciclos e 35.000 ciclos de carregamento.

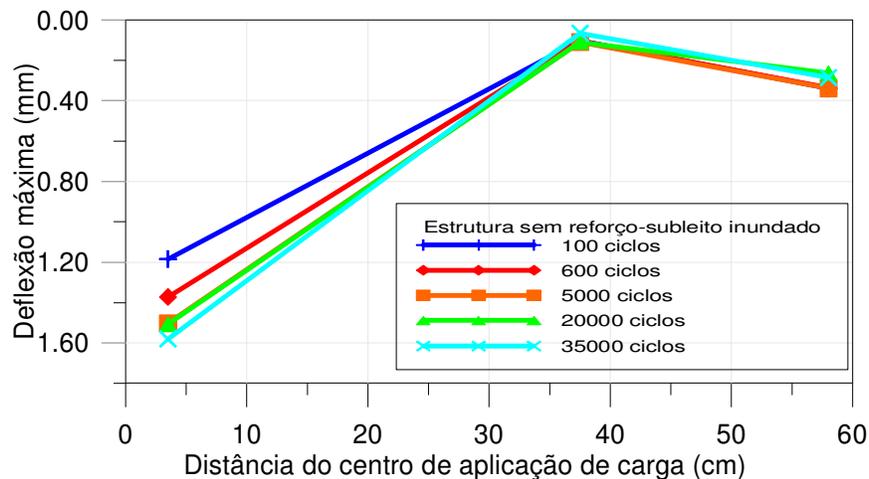


Figura 4.11 – Bacia de deslocamentos verticais em função do número de ciclos de carga – ensaio não reforçado.

Analisando-se as bacias de deflexão apresentadas na Figura 4.11, pôde-se observar que a tendência do desenvolvimento das deflexões segue o mesmo padrão apresentado no ensaio com a utilização da geogrelha: as deflexões máximas crescem com o aumento do número de ciclos. À distância de 37,5 cm existe uma convergência de valores e até pequena diminuição com o maior número de carga.

Comparando as Figura 4.8 e Figura 4.11, é importante observar que, com a utilização da geogrelha, consegue-se o efeito de enrijecimento do subleito em maior proporção com o aumento de ciclos de carga.

Os deslocamentos plásticos ou permanentes desenvolvidos durante a realização do ensaio foram determinados na superfície do pavimento sob a placa de carregamento. A Figura 4.12 apresenta o desenvolvimento dos deslocamentos como o número de ciclos, considerando-se apenas os resultados obtidos na vertical da aplicação do carregamento.

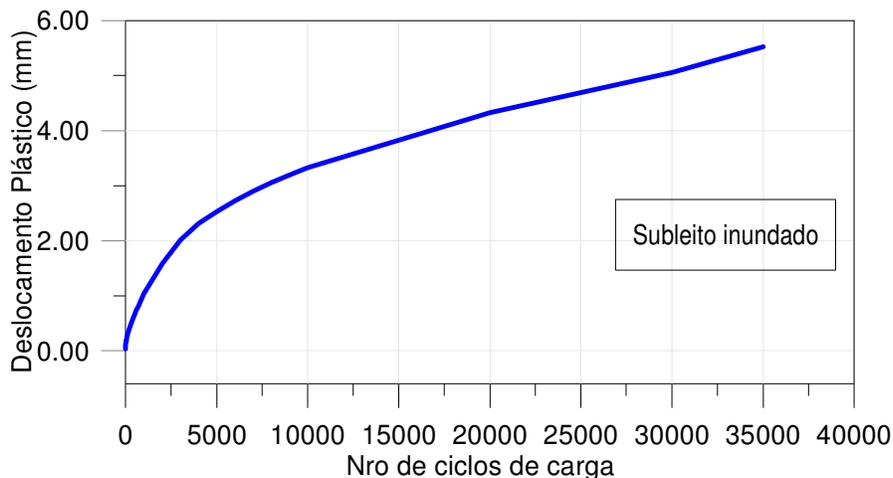


Figura 4.12 – Desenvolvimento dos deslocamentos superficiais plásticos no quarto ensaio –sem reforço mas subleito inundado.

Como se pode observar na Figura 4.12, o deslocamento superficial vertical plástico máximo foi de 5,53 mm com tendência a incrementar.

Para a condição do subleito na umidade ótima e inundado sem a inserção do reforço não é possível comparar as deformações surgidas pelo incremento da umidade, em função da deformação do teto que influenciou nos resultados do primeiro ensaio realizado na estrutura do pavimento.

Com os resultados dos deslocamentos superficiais verticais já apresentados para o caso do subleito inundado tanto para a estrutura reforçada e não reforçada pode-se mostrar o efeito da geogrelha inserida na interface do subleito-base através das Figura 4.13, Figura 4.14 e da Figura 4.15, tanto para os deslocamentos superficiais verticais elásticos ou reversíveis, bacias de deflexão e para os deslocamentos superficiais verticais plásticos ou permanentes.

#### 4.2.2.3.

#### Análise comparativa dos deslocamentos verticais elásticos para o subleito inundado

Para analisar o desenvolvimento dos deslocamentos verticais elásticos sem e com a inserção do reforço serão considerados apenas os resultados dos deslocamentos obtidos na vertical da aplicação do carregamento.

A Figura 4.13 e Figura 4.14 apresentam os desenvolvimentos do deslocamento máximo em função do número de ciclos de carga e as bacias de deflexão dos ensaios analisados nos itens 4.2.2.1 e 4.2.2.2, respectivamente. Os ensaios foram realizados após a inundação do subleito, para a estrutura com reforço e sem reforço.

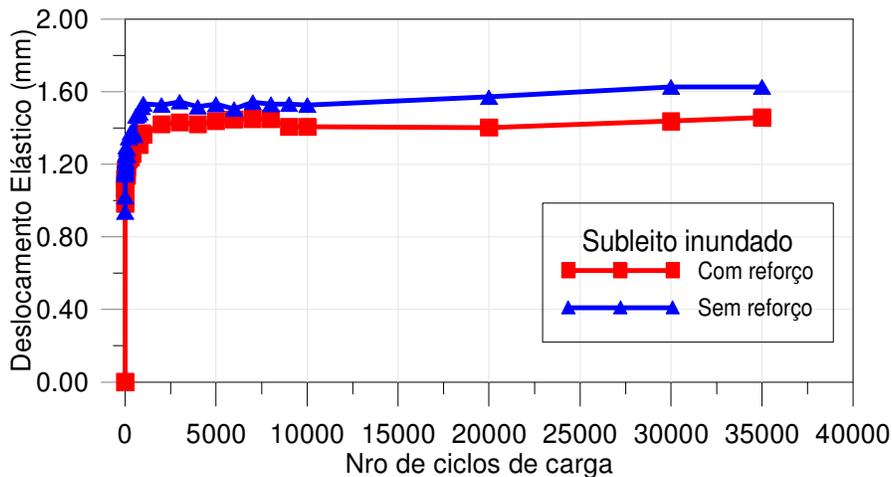


Figura 4.13 – Deslocamento elástico em função do número de ciclos de carga dos ensaios com e sem geogrelha, após inundação do subleito.

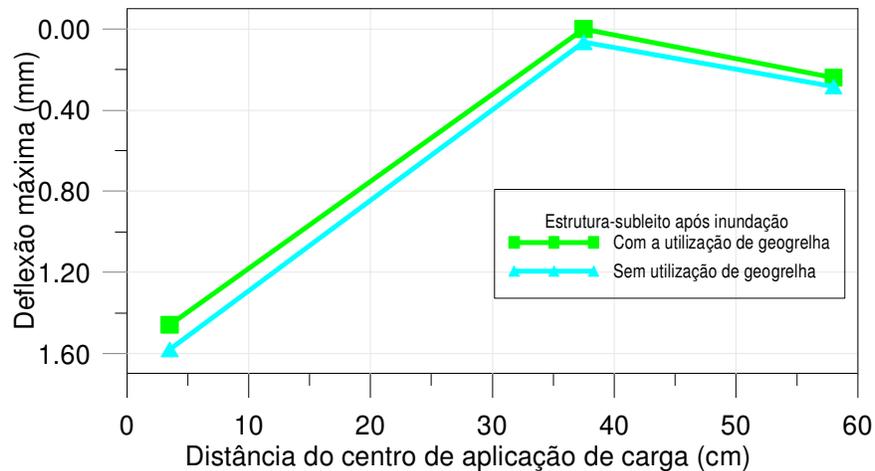


Figura 4.14 – Bacia de deflexão após 35.000 ciclos de carga para estruturas sem e com reforço e subleito inundado.

Comparando o desenvolvimento dos deslocamentos máximos dos dois ensaios analisados na Figura 4.13, verifica-se que existe uma tendência a estabilizar o deslocamento elástico máximo para o ensaio com a geogrelha, enquanto sem geogrelha a tendência do deslocamento é aumentar.

Como as deflexões máximas obtidas para os ensaios sem e com a utilização de geogrelha foram de 1,63 e 1,46 mm, respectivamente, verifica-se que a deflexão máxima para o ensaio com a utilização de geogrelha é 12% menor que a obtida do ensaio sem a mesma.

Comparando-se o efeito positivo da utilização da geogrelha no melhoramento do comportamento mecânico do pavimento com o subleito inundado com a pesquisa de Kakuda (2010), que obteve 27% de eficácia da geogrelha na redução das deformações elásticas, pode-se concluir que a utilização da geogrelha como reforço de base passa a ser mais eficaz à medida que a capacidade de suporte do subleito diminui, tomando como referência o valor do CBR não embebido dos solos das duas pesquisas.

#### 4.2.2.4.

#### **Análise comparativa dos deslocamentos verticais plásticos para o subleito inundado**

A Figura 4.15 apresenta o desenvolvimento dos deslocamentos plásticos dos ensaios apresentados nos itens 4.2.2.1 e 4.2.2.2, após a inundação do subleito para a estrutura com e sem reforço.

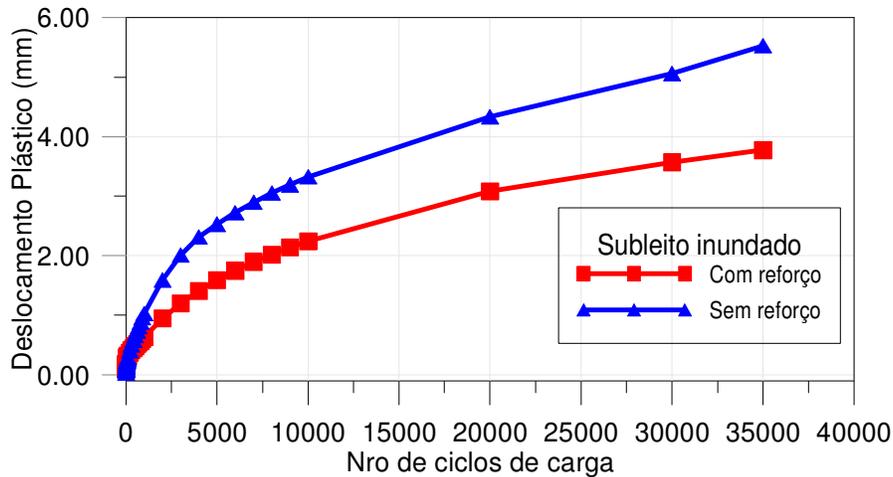


Figura 4.15 - Deslocamento plástico em função do número de ciclos de carga após 35.000 ciclos de carga para estruturas com e sem geogrelha após inundação do subleito.

Analisando a Figura 4.15, observa-se que as curvas apresentam formas semelhantes, apesar de não se ter alcançado a estabilização dos deslocamentos plásticos em ambas. Após 35.000 ciclos de carga, o deslocamento plástico obtido foi de 5,53 e 3,77 mm para a estrutura sem e com reforço, respectivamente. Comparando-se estes valores, conclui-se que o efeito positivo da utilização da geogrelha na redução dos deslocamentos plásticos é de 47%.

Quando se analisa o comportamento dos deslocamentos verticais após a inundação do subleito constata-se que o efeito positivo da geogrelha na redução dos deslocamentos plásticos é maior que ao obtido para os deslocamentos elásticos. Sendo assim, pode-se dizer que a utilização da geogrelha na condição do subleito inundado apresenta efeito positivo maior na redução dos deslocamentos plásticos em relação ao elástico.

Para o caso do subleito inundado para a estrutura reforçada e não reforçada o efeito positivo da geogrelha no melhoramento do comportamento estrutural do pavimento na redução das deformações superficiais (elásticas e plásticas) é menor quando comparado com encontrada por Kakuda, provavelmente devido ao solo utilizado como subleito nesta pesquisa apresentar um CBR de a 6% na condição submersa por 4 dias. Segundo a literatura, se obtêm melhores efeitos na utilização deste tipo de material de reforço quando os solos apresentam  $CBR \leq 3\%$ . Mesmo assim, pelos efeitos mostrados pelo uso da geogrelha nesta pesquisa pode-se concluir que a geogrelha como material de reforço melhora o comportamento estrutural do pavimento.

### 4.3. Análises Complementares

#### 4.3.1. Análise das deflexões obtidas pelo LWD (Light Weight Deflectometer)

A utilização de defletômetros de impacto permite avaliar o comportamento mecânico do pavimento em termos da deformabilidade. Nesta pesquisa foi utilizado um deflectômetro LWD por se tratar de experimento em modelo físico. Pretendeu-se avaliar o uso deste tipo de equipamento com parte dos ensaios não destrutivos em Tanque-Teste.

Os resultados obtidos com o LWD mostraram valores coerentes com os obtidos nos ensaios de carregamento cíclico realizados na estrutura do pavimento do Tanque-Teste como se mostra a seguir, o que torna seu uso promissor neste contexto.

Logo após a aplicação de carga cíclica correspondente a cada etapa do ensaio do Tanque-Teste foi realizado o ensaio dinâmico de impacto através do LWD seguindo o esquema mostrado na Figura 4.16, decidido de forma condicionada pela geometria da instrumentação existente no experimento. Não existe procedimento ou norma brasileira sobre o uso deste equipamento e, portanto não se tem critérios de seleção dos pontos a incluir na análise. Foram aproveitadas as condições da estrutura do pavimento reforçadas com o subleito na umidade ótima e inundada e também a estrutura não reforçada com o subleito inundado para os testes.

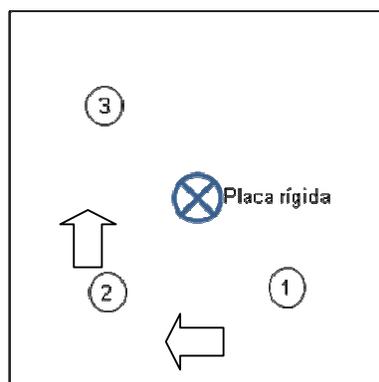


Figura 4.16 – Esquema em planta, da superfície do pavimento, no tanque dos pontos para realização de ensaios com o LWD.

#### 4.3.1.1.

#### Ensaio sobre a estrutura reforçada na condição do subleito compactado na umidade ótima

Foi a partir desta etapa dos ensaios que se pôde dispor deste equipamento pertencente ao Laboratório de Asfalto do Instituto Militar de Engenharia (IME). O método utilizado na realização dos ensaios com o LWD foi:

- Definição dos pontos para a aplicação da carga dinâmica por impacto através do LWD. Para a situação de cada ensaio foram eleitos três pontos como o indicado na Figura 4.16.
- Cada ponto foi ensaiado três vezes, e se obtêm a média dos deslocamentos elásticos resultantes.

Os resultados do ensaio para a estrutura do pavimento reforçado com a umidade ótima de compactação do subleito é mostrada na Figura 4.17.

A Tabela 4.2 apresenta os resultados do ensaio referentes à deformabilidade da estrutura do pavimento reforçada com o subleito compactado na umidade ótima decorrente da aplicação de carga do LWD.

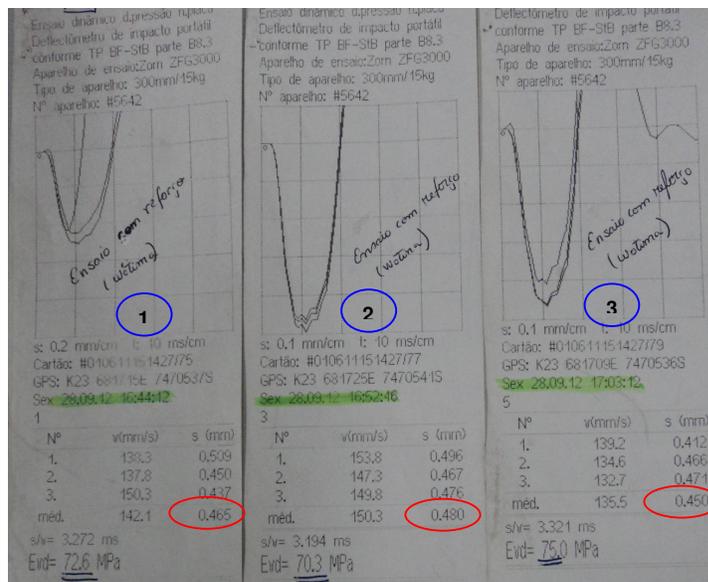


Figura 4.17 – Resultados obtidos pelo programa ZFG do LWD para a estrutura do pavimento reforçada na condição do subleito na umidade ótima.

Tabela 4.2 – Resultados do ensaio de LWD na estrutura de pavimento reforçada com o subleito compactado na umidade ótima .

Ponto	1		2		3	
	Leituras	Média	Leituras	Média	Leituras	Média
Deslocamentos elásticos (mm)	0,509	<b>0,465</b>	0,496	<b>0,481</b>	0,412	<b>0,450</b>
	0,450		0,467		0,466	
	0,437		0,480		0,471	

Analisando-se os resultados da Tabela 4.2, pode-se observar que nos três pontos de aplicação de carga do LWD se obtêm valores de deslocamentos elásticos (deflexão) próximos.

Comparando esses valores como os obtidos com o ensaio de cargas repetidas nessa mesma condição da estrutura do pavimento, mostrados na Tabela 4.3, pode-se observar que os valores de deformabilidade são menores tendo em vista que o nível de carga transmitido pelo LWD é de 15 kg e a forma de aplicação é por impacto, mas também aqui a rigidez do solo é incrementada pela presença da geogrelha.

Tabela 4.3 - Resultados do deflexão obtidos nos ensaios não destrutivos para a avaliação estrutural do pavimento reforçado - subleito compactado na umidade ótima.

Sistema de aplicação de carga	Deformação (mm)
LWD (Light Weight Deflectometer)	0,465
	0,481
	0,450
Carga cíclica repetida	0,80

#### 4.3.1.2.

#### Ensaio sobre a estrutura reforçada na condição do subleito inundado

Nesta condição do pavimento também foi aplicado o ensaio do LWD, após os 26 dias de espera para o avanço da franja capilar e após a aplicação dos 35.000 ciclos de carga do ensaio correspondente.

Foi seguido o método de ensaio descrito no item 4.3.1.1 e os resultados obtidos são mostrados na Figura 4.18. A Tabela 4.4 apresenta os resultados do ensaio LWD referentes à deformabilidade da estrutura do pavimento reforçada com subleito inundado.

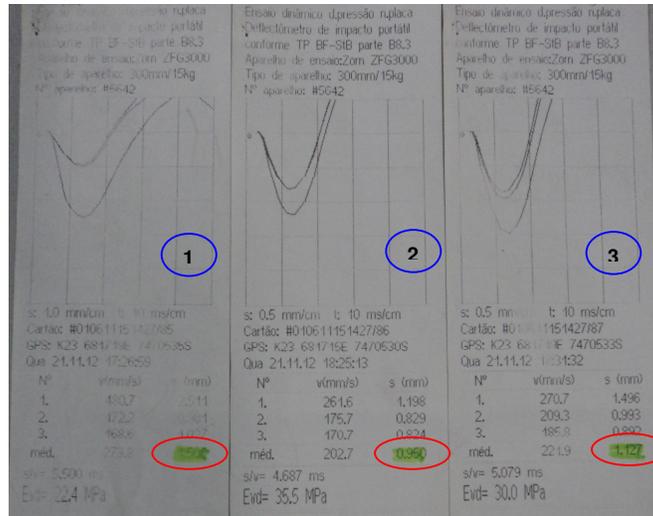


Figura 4.18 – Resultados do LWD obtidos pelo programa ZFG do LWD para a estrutura do pavimento reforçada - subleito inundado.

Tabela 4.4 – Resultados do ensaio de LWD na estrutura de pavimento reforçada com o subleito inundado.

Ponto	1		2		3	
	Leituras	Média	Leituras	Média	Leituras	Média
Deslocamentos elásticos (mm)	2,511	1,506	1,198	0,950	1,496	1,127
	0,981		0,829		0,993	
	1,027		0,824		0,892	

Segundo os resultados mostrados na Tabela 4.4, os deslocamentos elásticos (deflexões) aumentaram consideravelmente se comparados aos obtidos no ensaio anterior, isto se deve à perda de rigidez do subleito pelo efeito da água, que compromete a vida útil do pavimento.

Os deslocamentos registrados nos três pontos de análise apresentaram significativa diferença, sobretudo no ponto de ensaio “1”. Isto pode ter acontecido porque nesta condição de inundação do subleito, a acomodação das partículas do subleito pode ter sido diferente em cada seção do ponto considerado para este ensaio, e, a cada aplicação do impacto ter tido diferentes respostas de distribuição das tensões.

Comparando esses valores com os obtidos no ensaio de carga cíclica repetida, com referência ao deslocamento elástico desenvolvido na vertical da aplicação de carga, o valor da deflexão é próximo ao valor médio obtido no ponto “1”, como mostrado na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Resultados de deflexão obtidos nos ensaios não destrutivos para a avaliação estrutural do pavimento reforçado no caso de subleito inundado

Sistema de aplicação de carga	Deflexão (mm)
LWD (Light Weight Deflectometer)	<b>1,506</b>
	0,950
	1,127
Carga cíclica repetida	<b>1,46</b>

#### 4.3.1.3.

#### Ensaio sobre a estrutura não reforçada na condição do subleito inundado

Seguindo a metodologia do ensaio descrita no item 4.3.1.1, no pavimento sem reforço também foi aplicado o ensaio do LWD, obtendo-se os resultados mostrados na Figura 4.19. A Tabela 4.6 apresenta os resultados do ensaio referentes à deformabilidade elástica da estrutura do pavimento não reforçada com subleito inundado.

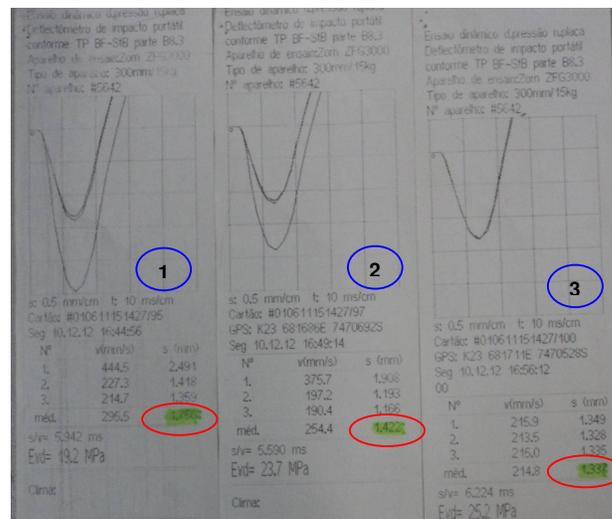


Figura 4.19 - Resultados obtidos pelo programa ZFG do LWD para a estrutura do pavimento não reforçada - subleito inundado.

Tabela 4.6 – Resultados do ensaio LWD na estrutura de pavimento não reforçada - subleito inundado.

Ponto	1		2		3	
	Leituras	Média	Leituras	Média	Leituras	Média
Deslocamentos elásticos (mm)	2,491	<b>1,756</b>	1,908	<b>1,422</b>	1,349	<b>1,337</b>
	1,418		1,193		1,328	
	1,359		1,166		1,335	

Segundo os resultados mostrados na Tabela 4.6, as deflexões registradas neste ensaio aumentaram se comparadas às desenvolvidas no ensaio com a estrutura reforçada também com o subleito inundado. O aumento que ocorreu com a retirada do material de reforço (geogrelha), confirma o efeito positivo que tem a geogrelha para prolongar a vida útil do pavimento.

A dispersão dos resultados das deflexões, registradas nos três pontos de análise, diminuiu em relação ao ensaio anterior de forma geral.

Foram comparados também esses valores com os obtidos no ensaio de carga cíclica repetida; com referência ao deslocamento elástico desenvolvido na vertical da aplicação de carga, o valor da deformação é próximo ao ponto “1” assim como mostra a Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Resultados de deflexão obtidos nos ensaios não destrutivos para a avaliação estrutural do pavimento não reforçado no caso do subleito inundado.

Sistema de aplicação de carga	Deformação (mm)
LWD (Light Weight Deflectometer)	<b>1,756</b>
	1,422
	1,337
Carga cíclica repetida	<b>1,63</b>

#### 4.3.1.4.

#### **Análise comparativa dos ensaios realizados com o Light Weight Deflectometer (LWD)**

Apresenta-se a análise dos resultados dos três ensaios realizados com o LWD. Os ensaios foram realizados com o subleito compactado na umidade ótima e inundado para as situações da estrutura reforçada e não reforçada. Para fins comparativos entre os ensaios realizados com o LWD é apresentada a variável do

módulo de resiliência obtida para cada ensaio. Este valor é dado pelo equipamento, sem interferência do operador e deve ser considerado como estimativa da rigidez sob as condições do ensaio de impacto.

A Tabela 4.8 mostra o resumo das deformações e módulos de resiliência obtidos nos ensaios realizados com o LWD.

Tabela 4.8 – Deslocamentos e módulos de resiliência obtidos com o ensaio do LWD neste estudo no tanque teste

Variável	Ponto de análise	Estrutura reforçada (subleito na umidade ótima)	Estrutura reforçada (subleito inundado)	Estrutura não reforçada (subleito inundado)
Deflexão (mm)	(1)	0,465	1,506	1,756
	(2)	0,481	0,950	1,422
	(3)	0,450	1,127	1,337
Módulo de Resiliência (MPa)	(1)	72,6	22,4	19,2
	(2)	70,3	35,5	23,7
	(3)	75,0	30,0	25,2

Analisando a Tabela 4.8, pode-se observar que:

- Os deslocamentos tiveram um aumento significativo quando a condição da umidade do subleito foi mudada pelo avanço da franja capilar. Isto se deve a que os módulos de resiliência diminuíram conforme indicado no item 4.3.3 (variação do módulo com a umidade). Essas variações se repetem em cada ponto analisado para cada ensaio de LWD. A perda de rigidez do subleito pelo incremento do nível d'água é observada nos resultados fornecidos pelo LWD para os ensaios sobre a estrutura reforçada com a variação da umidade do subleito.
- Nos ensaios realizados na estrutura reforçada e não reforçada com o subleito inundado, a inserção da geogrelha no pavimento gerou uma redução na deflexão. Essa redução nos pontos 1, 2 e 3 foi de 14%, 33% e 15% respectivamente. Pela similitude na percentagem de redução para os pontos 1 e 3 pode-se concluir que a inserção da geogrelha reduziu as deflexões em **14%**, valor próximo ao obtido com o ensaio do carregamento cíclico repetido (item 4.2.2.3).

- A presença da geogrelha também resultou mecanismo que se expressa num aumento no valor de módulo de resiliência para cada ponto analisado. Conclui-se que expectativa de melhoria da vida útil do pavimento deve - se à que a inclusão da geogrelha se reflete num módulo equivalente maior.

Assim também pode-se analisar as deformações obtidas pelas nove medições feitas para cada situação da estrutura do pavimento analisada com o equipamento do LWD. A Tabela 4.9 apresenta a média e o desvio padrão dos valores das deformações medidas.

Tabela 4.9 – Média e desvio padrão dos valores de deslocamentos obtidos nos ensaios com o LWD

Ponto	Deslocamentos (mm)		
	Estrutura reforçada		Estrutura não reforçada
	$W_{ótima}$	Inundado	Inundado
1	0,509	2,511	2,491
	0,450	0,981	1,418
	0,437	1,027	1,359
2	0,496	1,198	1,908
	0,467	0,829	1,193
	0,480	0,824	1,166
3	0,412	1,496	1,349
	0,466	0,993	1,328
	0,471	0,892	1,335
Média	0,465	1,195	1,505
Desvio padrão	0,030	0,536	0,427

Analisando a Tabela 4.9 pode-se observar que a média mantém a mesma ordem de grandeza se comparada a calculada em cada ponto de análise, para cada ensaio, realizado para cada situação da estrutura do pavimento avaliado. Também os valores de desvio padrão que indicam como os valores se comportam quando distantes da média, para o ensaio da estrutura reforçada com o subleito inundado mostram maior dispersão.

### 4.3.2. Análise das leituras das células de carga

A utilização de células de carga no topo do subleito e da base do pavimento teve como objetivo monitorar a transferência da carga imposta na superfície do pavimento para o interior da estrutura. Estas células estão numeradas e instaladas conforme mostrado na Figura 4.20. Pretendeu-se monitorar as reduções das tensões com o afastamento da vertical que passa pelo centro da carga. A Figura 4.21 e a Figura 4.23 mostram o desenvolvimento dos registros das leituras feitas pelas células de carga para o caso do pavimento não reforçado e reforçado na condição do subleito compactado na condição ótima respectivamente. Na parte inferior destas figuras pode-se ver uma tabela onde a coluna “Units/Div” representa o quanto de carga a escala vertical do gráfico expressa. A escala horizontal representa a duração total do pulso de carga, ou seja, 1 s, sendo 0,1 s de aplicação de carga e 0,9 s de relaxamento da mesma. Todas as medições foram realizadas durante cada aplicação do carregamento para cada situação da estrutura do pavimento analisada no presente trabalho.

Apresentam-se nas Figura 4.21, Figura 4.22 e Figura 4.23, a título ilustrativo, sequência de resultados gráficos gerados no equipamento de leitura utilizado nesta pesquisa, que mostra as respostas fornecidas pelas células de carga uma vez que se aplicava carga sobre o pavimento.

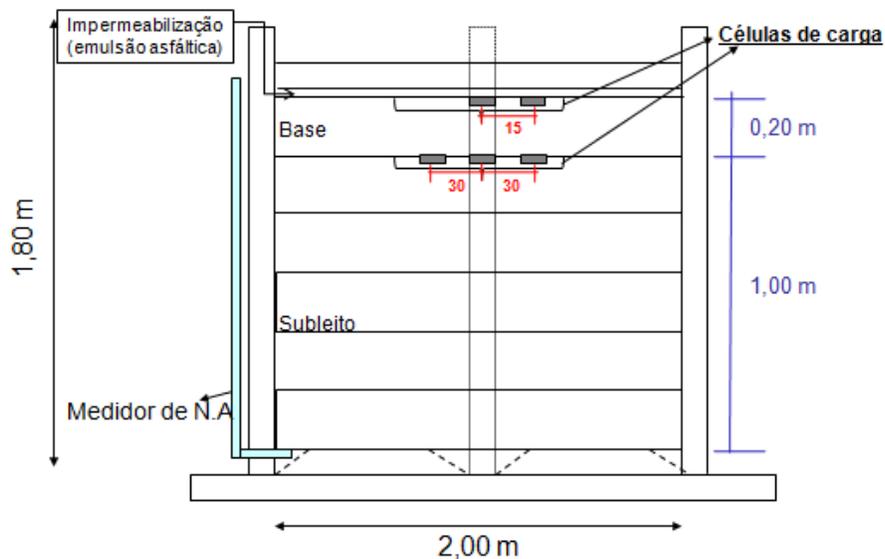


Figura 4.20 – Instalação das células de carga no pavimento estudado.



Figura 4.21 – Exemplo de pulsos de carga medidos pelas células instaladas no topo da base e do subleito para o pavimento não reforçado com o subleito compactado na unidade ótima.

Analisando a Figura 4.21, constata-se, como esperado, que à medida que se afasta da vertical do centro da carga, a tensão diminui (C-105 com C-107). Ainda, numa mesma vertical a carga que atinge determinado ponto da C-107 é duas vezes menor do valor da carga que atinge o mesmo ponto da C-105.

Após a realização desta etapa do ensaio foi detectado que a célula C-105, apesar de estar na vertical mais próxima à aplicação de carga não registrava mais pulsos de carga, em comparação com a célula C-107 que se encontrava 20 cm abaixo, como se pode observar na Figura 4.22. Possivelmente a capacidade nominal em compressão da célula C-105 foi atingida durante alguma fase do carregamento deixando de funcionar adequadamente.

Por esse motivo, a célula C-105 foi substituída pela célula C-102, para continuar com o desenvolvimento dos ensaios. (Figura 4.23).



Figura 4.22 – Pulsos de carga registrados pela célula (C-105) onde indica que sua capacidade nominal foi superada.



Figura 4.23 - Pulsos de carga medidos pelas células instaladas no topo da base e do subleito para o pavimento reforçado com o subleito compactado na unidade ótima.

Analisando a Figura 4.23, constata-se nesse caso, que à medida que se afasta horizontalmente da vertical de aplicação da carga, a carga diminui, isto aconteceu no caso das células C-106 e C-108 (pulso amarelo e turquesa respectivamente). Também se pode observar o efeito entres as células C-102 e C-107, que à medida que se afasta da vertical do centro da carga, a tensão diminui, sendo que a célula C-102 foi a que registrou maiores tensões por encontrar-se mais próxima à aplicação de carga.

Mostra-se com estes resultados que havia transmissão de esforços entre camadas a cada pulso de carga, que estas chegavam amortecidas ao subleito e também são menores ao longo de radiais, em torno da placa carregada, o que justifica as deflexões decrescentes nestas posições. Isto obviamente está coerente com a teoria da elasticidade de meios estratificados.

#### **4.3.3. Variação do Módulo de Resiliência com a umidade**

Como foi mencionado no item 3.3.6, foi utilizado também o programa SicTri como sistema de aquisição de dados, que permite a aplicação de uma combinação de tensões para calcular módulos de resiliência decorrentes do estado de tensões que se formam no ensaio de carga repetida. O ensaio simula um estado de tensões que se desenvolvem num trecho do pavimento que varia com a posição da carga móvel P.

Visando medir a influência da umidade e dos níveis de tensões no valor do módulo de resiliência equivalente da estrutura do pavimento, foram utilizados os pares de tensões do ensaio de carga repetida para a determinação do módulo de resiliência, para avaliar condições de carregamento diferentes da tensão utilizada ao longo desta pesquisa. A tensão confinante é representada através das paredes do tanque, sendo um valor constante, e a tensão desvio é a tensão vertical cíclica aplicada sobre a placa de contato com a superfície do pavimento.

Mudança da umidade ocorre, em casos reais, em regiões com grandes variações de lençol freático ou entrada de água por outras fontes na estrutura do pavimento, tal como na região amazônica e nas de clima superúmido, ou mesmo em pavimentos com revestimento bastante trincados superficialmente.

O objetivo destes ensaios foi de verificar a influência da umidade nos valores do “módulo de resiliência equivalente” da estrutura do pavimento.

A Figura 4.24 mostra a título ilustrativo a linha de tendência do módulo equivalente para a estrutura do pavimento reforçado nos casos do subleito encontrava-se compactado na umidade ótima e após a inundação. O resultado representa a variação a variação do  $M_R$  em função da variação do estado de tensão, expresso pelo modelo potencial de  $M_R$  em função da tensão desvio (tensão vertical cíclica).

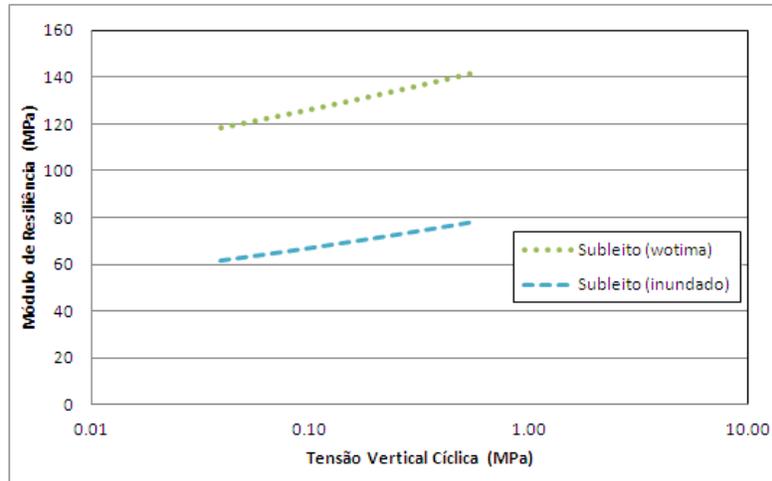


Figura 4.24 – Gráfico do  $M_R$  vs a Tensão Vertical Cíclica na estrutura do pavimento reforçada para os casos do subleito compactado na umidade ótima e inundado.

Analisando a Figura 4.24, pode-se observar que o incremento da umidade fez com que os valores do módulo equivalente diminuíssem obtendo-se para a condição do subleito antes e após da inundação na aplica o do último par de tensões, módulos de 142 e 78 MPa, respectivamente, ou seja, o incremento da umidade originou uma redu o no valor do módulo de 55%. Esse efeito foi verificado também por Takeda (2006), quando avaliou a influência da umidade p s-compac a o no comportamento mecânico de solos do interior do Estado de São Paulo.

Ainda, analisando a Figura 4.24, observa-se que no decorrer da aplica o do par de tensões, para ambas condi es de umidade do subleito, o valor do módulo de resiliência aumenta com o aumento da tensão vertical cíclica, acredita-se que para um pavimento rodoviário disposto em camadas, a camada de maior rigidez, ou seja, a base estaria contribuindo mais para os valores de módulo de resiliência equivalente medido deste forma.

#### 4.3.4. Análise das leituras realizadas pelos tensiômetros de alta capacidade (TAC)

Aguilar (1990 *apud* Silva, 2009), afirma que a medida direta da suc o em solos   difícil de ser realizada, sendo usualmente possível para valores baixos de suc o (menores do que 1 atm.).

A análise dos tensiômetros de alta capacidade empregados nesta pesquisa foi feita para as duas condições de umidade do subleito. O interesse da pesquisa é a análise dos valores de sucção que forneceram os tensiômetros colocados nas camadas do subleito.

Quando se iniciou o registro das leituras dos tensiômetros, de forma simultânea, pôde-se observar que as primeiras leituras apresentaram bastante variabilidade nos valores da sucção, acredita-se que pelo efeito da colocação da lama bentonítica. Após três dias do monitoramento, as leituras estabilizaram-se registrando os tensiômetros TAC-109 e TAC-111 leituras similares, considerando-se que neste momento tinha sido atingido o equilíbrio do contato do solo com o tensiômetro. No entanto, os tensiômetros TAC-110 e TAC-113 registraram valores diferentes dos outros e pode-se supor que o contato tensiômetro - solo não foi garantido. A diferença entre as leituras registradas por eles se repetiu até o final dos ensaios, portanto, não se teve total confiança nas leituras nesses transdutores e só foram analisados os valores da sucção dos dois primeiros tensiômetros mencionados neste item.

É importante mencionar também que, como a calibração do tensiômetro TAC-112 apresentou certa dificuldade, decidiu-se então que ia ser colocada na camada da base, tendo em vista que a mesma não sofreria mudança drástica na sua umidade e, portanto na sucção, além de ser um material muito granular já não propício ao desenvolvimento de capilares.

Durante a realização do ensaio sobre a estrutura reforçada na condição do subleito compactado na umidade ótima foram registrados valores de sucção, tal como mostra a Tabela 4.10, que também apresenta valores de umidade, registrados pelos TDRs, para cada camada correspondente ao TAC instalado.

Tabela 4.10 – Valores de sucção máximos registrados pelos TAC instalados na estrutura do pavimento (subleito compactado na umidade ótima).

<b>Estrutura do pavimento</b>	<b>TAC N°</b>	<b>Sucção (kPa)</b>	<b>Umidade registrada pelos TDRs (%)</b>
Subleito (1,00m)	109	-8,92	16,67
	110	-13,99	16,17
	111	-8,27	17,07
	113	-18,49	17,17
Base (0,20m)	112	-49,95	5,34

Como se pode observar na Tabela 4.10, os valores de sucção registrados pelos tensiômetros TAC-109 e TAC-111 apresentam valores de sucção próximos, no entanto, os tensiômetros TAC-110 e TAC-113 diferem muito dos valores obtidos pelos outros mesmo com umidades parecidas.

Quando analisada a relação entre a umidade e a sucção, uma umidade maior corresponde uma menor sucção e uma umidade menor corresponde uma maior sucção, pode-se observar com respeito às duas variáveis (umidade e sucção) para os dois materiais utilizados que esta relação é obtida.

Terminada a etapa de ensaios com o subleito compactado na umidade ótima foi inundado o solo do subleito, sendo também interesse os valores da sucção nesta condição do subleito. Nos trabalhos de inserção da geogrelha que implicou a retirada da camada de base para logo inserir o material de reforço (geogrelha) e novamente compor a camada compactada, o tensiômetro TAC-112 foi prejudicado perdendo-se a calibração do mesmo, a partir desse momento ele registrava valores muito variáveis a cada instante, descartando-se suas leituras.

A Tabela 4.11 mostra os valores de sucção dos tensiômetros TAC-109 e TAC-111 durante o desenvolvimento do terceiro ensaio no Tanque-Teste quando o subleito da estrutura reforçada foi inundado. As leituras foram registradas após o tempo de uniformização da umidade ao longo do perfil do subleito, ou seja, após 26 dias.

Tabela 4.11 – Valores de sucção máximos registrados pelos TAC instalados na estrutura do pavimento (subleito inundado).

Estrutura do pavimento	TAC N°	Sucção (kPa)	Umidade registrada pelos TDRs (%)
Subleito (1,00m)	109	-1,06	27,67
	111	-0,57	27,57

Comparando os valores de sucções para ambas as situações de umidade do subleito, pode-se notar que houve diminuição da sucção quando o solo foi submetido à inundação, como mostra a Tabela 4.12, como esperado.

Tabela 4.12 – Valores de sucção máximos registrados nas duas condições de umidade do subleito.

Estrutura do pavimento	TAC	Umidade ótima (%)	Sucção (kPa)	Umidade após inundação (%)	Sucção (kPa)
Subleito (1,00m)	109	16,67	-8,92	27,67	-1,06
	111	17,07	-8,27	27,57	-0,57

Silva (2009), na sua tese de doutorado, obteve valores de sucção para um solo residual (horizonte C), com a utilização dos mesmos tensiômetros utilizados nesta pesquisa, para três diferentes situações de umidade: a) durante a instalação do instrumento; b) durante a saturação do pavimento até o NA no topo do subleito; c) 4 dias após o rebaixamento do NA a 15 cm abaixo do tensiômetro. Supõe-se que o valor de sucção registrada na primeira condição da umidade corresponde a um subleito com a menor umidade, ou seja, a umidade na condição ótima de compactação ou próxima a ela, já que o pesquisador menciona que essa condição analisada foi após três ciclos completos de saturação e drenagem. Os valores de sucção obtidos na pesquisa de Silva (2009) são apresentados na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 – Valores de sucção e umidade apresentadas no trabalho de Silva (2009) para cada situação de umidade.

<b>Situação de umidade</b>	<b>Umidade (%)</b>	<b>Sucção (kPa)</b>
(a)	10,00	-21,09
(b)	19,30	-2,86
(c)	18,10	-3,02

Analisando os resultados apresentados na Tabela 4.12 e na Tabela 4.13 pode-se observar:

- Em ambos os trabalhos os valores da sucção obedecem à umidade na qual foram medidas, verificando o bom desempenho dos tensiômetros.
- Os valores de sucção encontram-se num intervalo entre -21,09 e -3,02 kPa para o trabalho de Silva, no entanto, para o presente trabalho esse intervalo se encontra entre -8,92 e -0,57 kPa, influenciando nestes valores o teor de umidade de cada situação.
- Comparando a situação de umidade ótima do subleito de ambos os trabalhos, os valores de sucção de -21,09 e -8,92 kPa obtidos para as umidades de 10% e 17%, respectivamente, pode-se concluir que, esta diferença se justifica também porque os solos são diferentes.

Pode-se concluir que os tensiômetros de alta capacidade responderam satisfatoriamente aos efeitos de variação da umidade do subleito fornecendo valores de sucção coerentes com cada situação da umidade do solo do subleito.

Analisando os valores de sucção nas duas condições de umidade do solo utilizado no subleito, obtidos com os tensiômetros de alta capacidade e através da técnica do papel filtro (curva característica) pode-se observar que a diferença é bastante grande concluindo que a forma de preparação da amostra na qual foi medida a sucção e o volume do material empregado é determinante para a obtenção dos resultados.

Ainda analisando os resultados obtidos nos itens 4.3.3 e 4.3.4 pode-se observar a variação do módulo de resiliência e da sucção quando a condição de umidade de subleito varia, existindo uma relação entre a diminuição dos valores de módulo e da sucção e o aumento da umidade do solo pelo efeito da inundação

do subleito. Esta relação também pode ser considerada em sentido inverso, no aumento dos valores de módulo e sucção quando o subleito encontrava-se na umidade ótima (umidade menor).

#### **4.3.5.**

#### **Módulos de resiliência obtidos a partir da retroanálise das bacias de deflexão**

Com o objetivo de estimar o valor do módulo de resiliência da camada de base e do subleito, efetuou-se uma retroanálise mediante o programa computacional ELSYM5, empregando como “valores de entrada” as espessuras e “módulos semente” do subleito e da base, variando-se o valor do módulo de ambas as camadas até obter “valores de saída” próximos à deflexão obtida nos ensaios de carregamento cíclico para as etapas da estrutura reforçada e não reforçada quando o subleito encontrava-se inundada.

O programa ELSYM5 (FHWA, 1978) é um programa em Fortran, que calcula tensões, deformações e deslocamentos para um sistema tridimensional de camadas elásticas. O carregamento pode ser de uma ou mais cargas aplicadas uniformemente sobre uma área circular na superfície do sistema. Cada camada é de espessura uniforme e estende-se horizontalmente. O programa pode analisar o sistema de camadas assente sobre uma base rígida de espessura finita ou assente sobre um semi-espaço elástico (Silva, 2001).

Para as análises, assumiu-se que os materiais apresentam comportamento elástico-linear com características mecânicas como as de materiais encontrados em rodovias brasileiras. A Tabela 4.14 apresenta os módulos de elasticidade e os coeficientes de Poisson considerados para o subleito e a camada da base, essas características mecânicas são encontrados na bibliografia, dos quais só os coeficientes de Poisson foram utilizados como dado de entrada para a realização da retroanálise no presente trabalho. Mas pode-se perceber que a retroanálise levou a valores próximos a estes na condição de umidade ótima e com a geogrelha, como mostrado a seguir.

Tabela 4.14 - Módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson típicos para os materiais que compõem um pavimento flexível.

Materias	Módulo de elasticidade (MPa)	Coefficiente de Poisson
Base granular	450	0,35
Subleito	45	0,30

A carga externa aplicada para a qual foi obtida a bacia deflectométrica é de 26,96 kN neste experimento.

As bacias de deflexão utilizadas para a retroanálise são as que correspondem às estruturas do pavimento para as quais foi utilizada a geogrelha e também para a estrutura sem geogrelha com o subleito inundado.

A Tabela 4.15 apresenta os módulos de resiliência da camada de base e subleito obtidos por retroanálise das bacias de deflexões (Figura 4.4) fornecidas pelo ensaio com a utilização de geogrelha com o subleito compactado na umidade ótima. Nesta tabela também são mostradas as deflexões obtidas tanto no ensaio de carga cíclica no Tanque-Teste e através da retroanálise.

Tabela 4.15 – Módulos de resiliência obtidos a partir da retroanálise das bacias de deflexões com reforço, para a condição de subleito compactado na umidade ótima.

Camada	Deflexão máxima (mm)		Módulo de Resiliência (MPa)
	Ensaio Carga Cíclica "Modelo Físico"	Retroanálise (ELSYM5)	Retroanálise (ELSYM5)
Base	0,80	0,78	514
Subleito			74

Analisando os resultados da Tabela 4.15, torna-se visível a mínima diferença dos valores de deflexão entre a bacia deflectométrica (estrutura física) e a teórica obtida pelo ELSYM5. A deflexão máxima recalculada pelo ELSYM5 apresenta um bom ajuste ao valor da deflexão obtida no ensaio.

Para averiguar o efeito do umedecimento do subleito foram determinados os módulos de resiliência a partir da retroanálise das curvas de deflexões obtidas após o processo de inundação do subleito (Figura 4.14). A Tabela 4.16 apresenta os módulos de resiliência obtidos a partir da retroanálise dos ensaios com e sem a utilização da geogrelha, após a inundação do subleito, assim também as deflexões

máximas obtidas em ambos os métodos de avaliação do comportamento da estrutura do pavimento.

Tabela 4.16 - Módulos de resiliência obtidos a partir da retroanálise das bacias de deflexões, para a condição de subleito inundado

Camada	Estrutura reforçada			Estrutura não reforçada		
	Deflexão máxima (mm)		M <sub>R</sub> (MPa)	Deflexão máxima (mm)		M <sub>R</sub> (MPa)
	Ens.Carga Cíclica Modelo Físico	Retroanálise	Retroanálise	Ens. Carga Cíclica Modelo Físico	Retroanálise	Retroanálise
Base	1,46	1,42	300	1,63	1,62	266
Subleito			45			40

Analisando a Tabela 4.16, observa-se que para as mesmas condições de umidade do subleito, com a retroanálise realizada para cada caso, há pequeno incremento do módulo para a estrutura do pavimento reforçada. Verifica-se a porcentagem de acréscimo dos módulos de resiliência em função da utilização da geogrelha de 13%, esse fato indica que a inserção da geogrelha é equivalente a um pequeno enrijecimento da camada de base. Este valor está coerente com as análises feitas com as deflexões. O maior aporte estrutural da geogrelha, no entanto, mostrou neste experimento ser nas deformações permanentes.

#### 4.3.6.

#### **Relação entre a abertura da malha da geogrelha e o tamanho médio dos grãos da brita.**

A característica principal da geogrelha é que a abertura da sua malha é grande o suficiente para permitir o entrosamento das partículas do solo ou do material granular em contato com a mesma, proporcionando uma interação por atrito e intertravamento, que restringe a sua movimentação lateral, desenvolvendo o mecanismo da restrição à movimentação lateral do solo. Mecanismo que desenvolve a geogrelha indicado no item 2.6 (Figura 2.16).

Para o caso de solos granulares, a abertura das geogrelhas pode permitir que partículas de solo encaixem-se entre as nervuras, aumentando assim sua resistência ao arrancamento (Teixeira, 2003).

Kakuda (2010) menciona que a geogrelha utilizada na restauração de pavimentos flexíveis deve apresentar uma relação entre a abertura da malha e diâmetro máximo do agregado deve ficar no intervalo de 2 a 10.

A relação entre a abertura da malha da geogrelha (40 mm) e o diâmetro médio dos grãos da brita (1”) utilizados nesta pesquisa é de 1,5, tratando-se de um material com uma porcentagem de finos de 10%, o intertravamento entre o material e a geogrelha, seria mais eficaz se o material não tivesse finos.

Os solos granulares bem graduados, ainda, de oferecer maior resistência apresentam melhor intertravamento entre os seus grãos, os grãos maiores deslizam com maior dificuldade quando empurrados pelos elementos transversais. Os grãos maiores movimentam-se de encontro os grãos menores formando progressivamente uma massa firme de solo em frente aos elementos transversais, o que promove uma maior resistência passiva e, por consequência, uma maior resistência ao deslizamento.

Garantindo o intertravamento efetivo do agregado e a geogrelha que ocorre na abertura da malha, a inclusão atua confinando o material e melhora suas características de resistência e rigidez. Assim, a maior economia que o reforço pode gerar é a redução da espessura da camada de base.