

8 Resultados da instrumentação do muro

Neste item são apresentados os resultados obtidos com a instrumentação descrita anteriormente nas duas seções de muro reforçado estudadas (E20+15 e E33+12). Também são apresentadas breves análises preliminares acerca dos comportamentos observados.

8.1. Resultados das “caixas suecas”

A Figura 133 e a Figura 134 apresentam os resultados do acompanhamento dos recalques da base das seções de muro E20+15 e E33+12 medidos com caixas suecas, ao longo da construção do muro.

Na seção E20+15, as caixas A, B e C estão a 186cm, 305cm e 447cm de distância da face do muro, respectivamente. Na seção E33+12 as caixas D, E e F distam 160cm, 300cm e 440cm da face do muro, respectivamente.

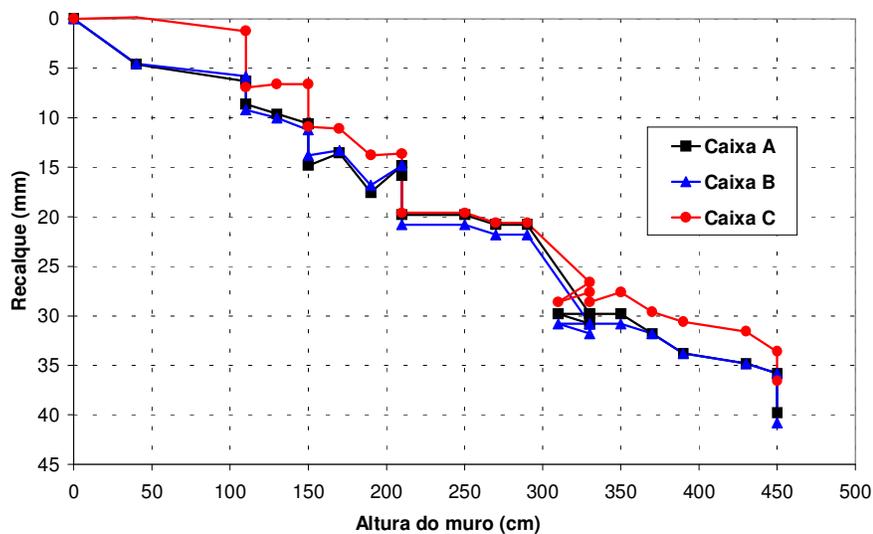


Figura 133 - Recalques na base do muro de solo reforçado para a seção E20+15.

Os resultados apresentados na Figura 133 mostram que os recalques ocorridos foram da ordem de 40mm na seção E20+15.

Não houve recalques diferenciais apreciáveis nesta seção. Na seção E33+12 os resultados aparentemente indicam a ocorrência de recalques diferenciais. A caixa E atinge um recalque final de 16mm, enquanto as caixas D e F apresentam valores finais em torno de 10mm, conforme se observa na Figura 134.

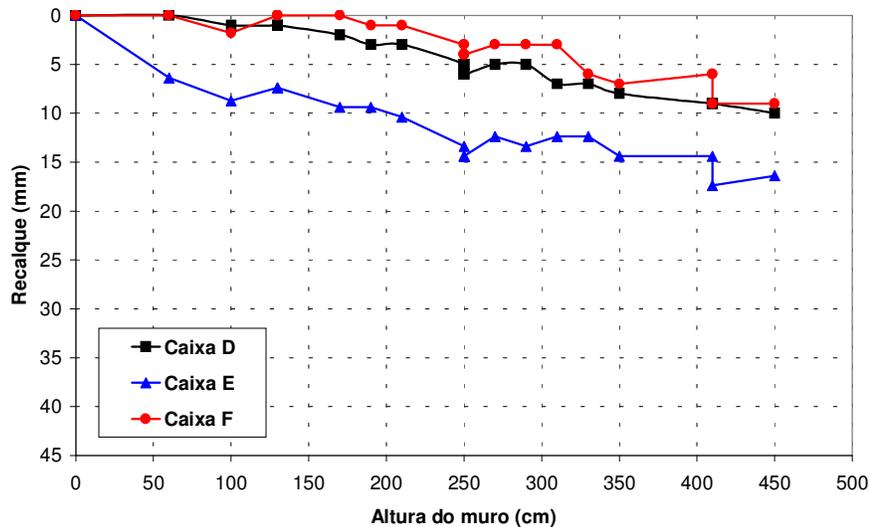


Figura 134 - Recalques registrados na base do muro de solo reforçado para a seção E33+12.

Não há uma razão que justifique a ocorrência deste recalque diferencial, tendo em vista os recalques uniformes ocorridos na seção E20+15. Observa-se, além disto, que as curvas de recalque das caixas D, E e F têm aproximadamente o mesmo formato, exceto no trecho inicial entre 0cm e 60cm de altura de muro.

Também pode-se considerar que não faz sentido que aproximadamente 1/3 do recalque total da caixa tenha ocorrido com apenas 60cm da altura de muro construídos.

É, portanto, provável que tenha ocorrido um erro na leitura inicial (“leitura de zero”) da caixa E. Como todas as medidas seguintes são referenciadas à leitura de zero, o erro propaga-se até a leitura final.

Para corrigir este erro, optou-se por igualar a leitura de zero à leitura de 60cm de altura do muro, tendo em vista que as caixas D e F só apresentaram recalques para alturas de muro superiores a 60cm. O resultado corrigido é mais coerente, conforme demonstra a Figura 135.

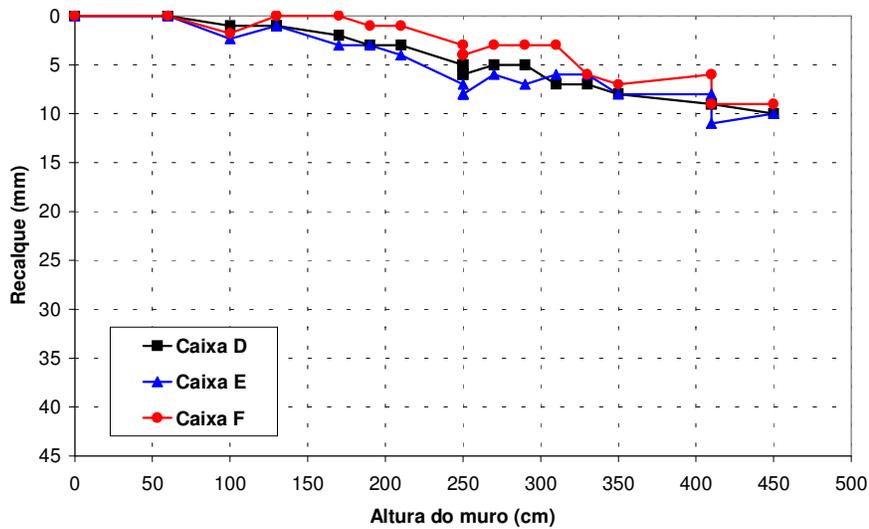


Figura 135 - Recalques corrigidos na base do muro de solo reforçado para a seção E33+12.

Observa-se, entretanto, que os recalques ocorridos nas duas seções são diferentes. Para efeitos de comparação, pode-se estimar, de maneira aproximada, o recalque na base do muro, devido ao seu peso próprio, pela teoria da elasticidade, conforme a seguinte expressão (Pinto, 2000):

$$\rho = I \cdot \frac{\sigma_o \cdot B}{E} \cdot (1 - \nu^2) \quad (8.1)$$

onde:

- ρ : recalque na superfície da área carregada;
- I : coeficiente de forma e rigidez do elemento de carregamento;
- σ_o : tensão uniformemente distribuída na superfície;
- B : largura do elemento de carregamento;
- E : módulo de elasticidade do solo;
- ν : coeficiente de Poisson do solo.

Para o cálculo em questão, considerou-se o muro de solo reforçado e o aterro no seu tardo como um carregamento uniformemente distribuído sobre a superfície do solo de fundação. O fator I , para o centro de uma fundação flexível, com razão comprimento-largura maior que 10 equivale a 2,54 (Pinto, 2000). A

largura adotada corresponde à metade da largura total do muro e do aterro na cota de base do muro, sendo igual a 9,25m.

Com estes parâmetros, os módulos de elasticidade necessários para se obter recalques de 10mm e 40mm são, respectivamente, 180MPa e 48MPa. A razão entre os dois valores é menor que quatro, podendo-se atribuir às diferenças nas leituras à variabilidade natural do material compactado na base do muro.

Os valores de rigidez estimados são bastante superiores aos obtidos nos ensaios de laboratório. Cabe ressaltar, entretanto, que o cálculo referido acima é aproximado, realizado apenas para fins de comparação. O solo não se comporta como material elástico linear e o módulo de elasticidade empregado deveria levar em conta os níveis de deformação e tensão.

Pelas medições das caixas suecas, supõe-se que os níveis de deformação são pequenos. Os níveis de tensão envolvidos devem ser elevados, considerando-se que o bulbo de carregamento propaga-se para baixo, dentro do aterro compactado, e que a largura considerada foi de 9,25m.

8.2. **Resultados dos *tell-tales***

As Figura 136 a Figura 141 apresentam os resultados do acompanhamento dos deslocamentos dos três níveis de *tell-tales* das seções de muro E20+15 e E33+12, ao longo do processo de construção do muro até a altura de 450cm.

Cabe ressaltar que a administração da obra decidiu, em determinado momento, interromper a construção nas seções que já tinham alcançado a altura de 450cm e altear as seções com construção mais atrasada, de maneira que o alteamento final, até 500cm, fosse realizado simultaneamente em todas as seções.

A seção E20+15 atingiu a altura de 450cm em cinco de outubro de 2002, enquanto a seção E33+12 atingiu a mesma altura dez dias depois.

A construção na seção E33+12 foi realizada em ritmo contínuo até a altura final. Entretanto, devido ao planejamento da obra, a construção da seção E20+15 foi interrompida por mais de duas semanas. Assim que todas as seções do muro ao longo do dique atingiram a referida altura foi realizado o alteamento até 500cm na seção E20+15.

Esta interrupção na construção do muro é, portanto, responsável pelas discontinuidades verificadas na altura de 450cm dos gráficos deslocamento vs. altura de muro.

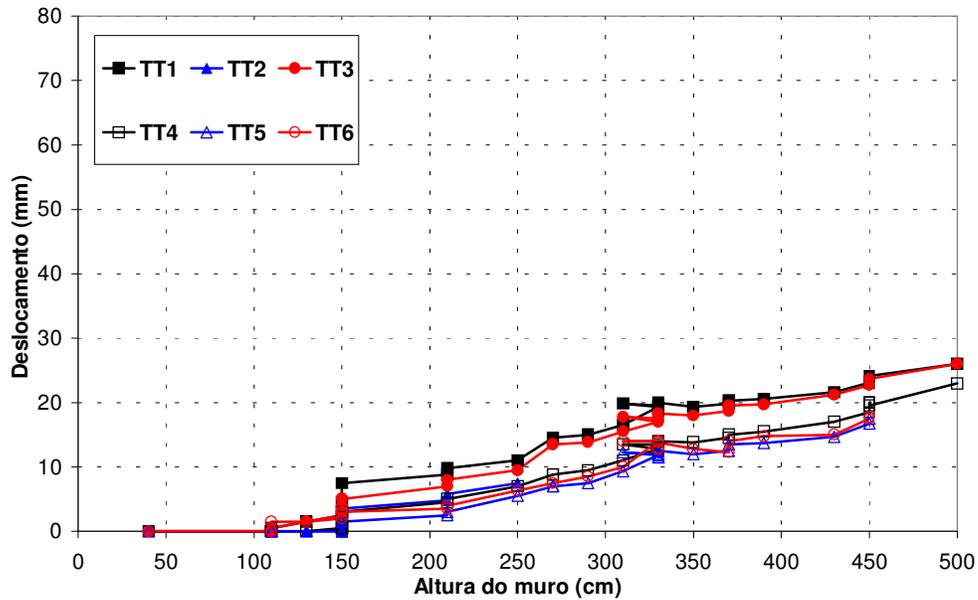


Figura 136 - Deslocamentos medidos pelos *tell-tales* da seção E20+15 na altura de 40 cm, em função da altura de muro construída.

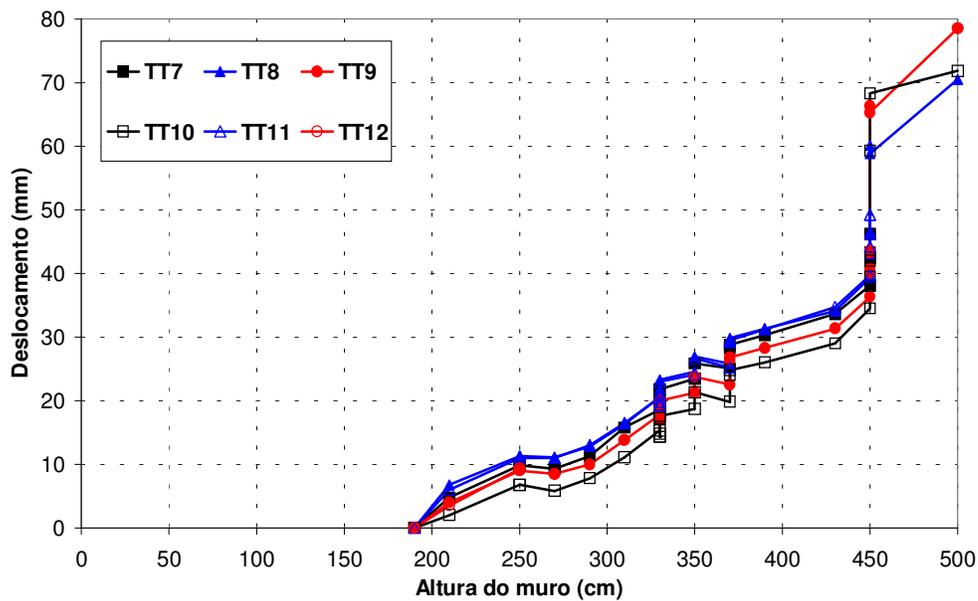


Figura 137 - Deslocamentos medidos pelos *tell-tales* da seção E20+15 na altura de 190 cm, em função da altura de muro construída.

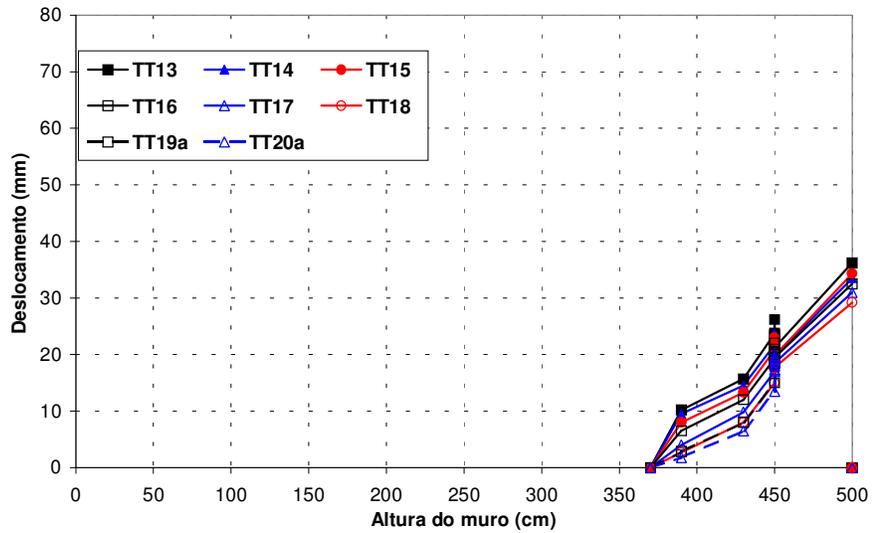


Figura 138 - Deslocamentos medidos pelos *tell-tales* da seção E20+15 na altura de 370 cm.

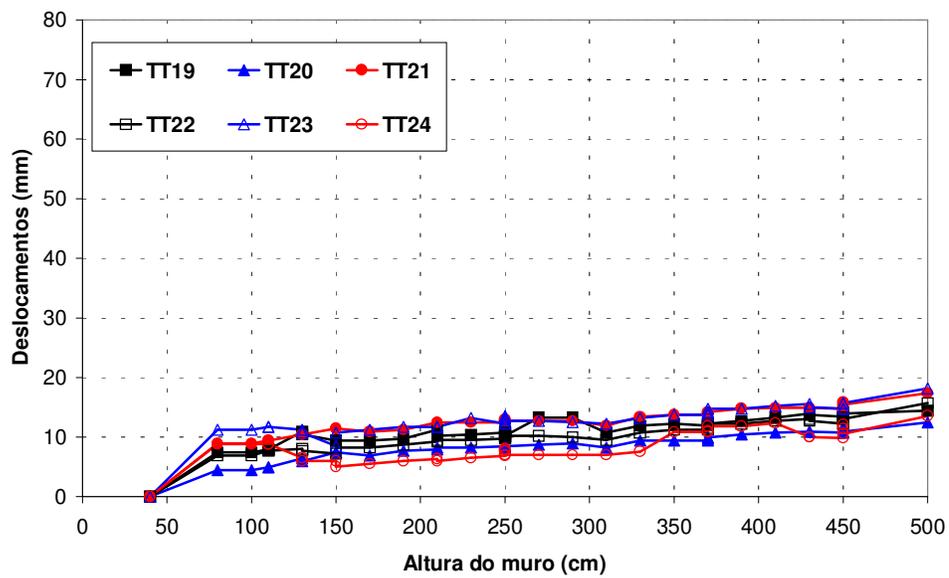


Figura 139 - Deslocamentos medidos pelos *tell-tales* da seção E33+12 na altura de 40 cm.

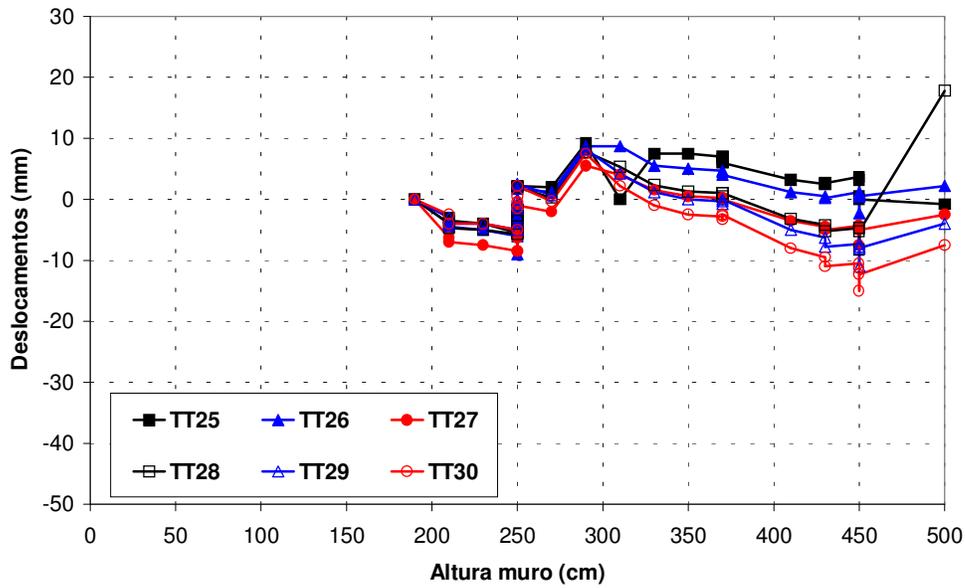


Figura 140 - Deslocamentos medidos pelos *tell-tales* da seção E33+12 na altura de 190 cm.

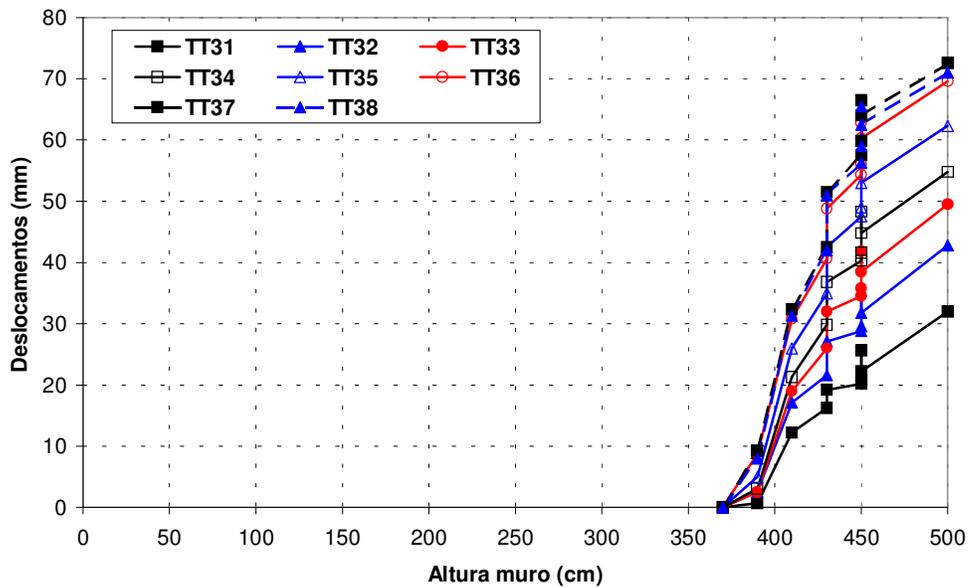


Figura 141 - Deslocamentos medidos pelos *tell-tales* da seção E33+12 na altura de 370 cm.

Os resultados obtidos mostram um aumento dos deslocamentos com o crescimento da altura de muro, o que indica que as deformações crescem quando as geogrelhas vão progressivamente entrando em carga, conforme seria de esperar.

Cabe ressaltar uma série de fatos, listados a seguir, que ocorreram durante a construção do muro.

A camada de solo correspondente à altura entre 310 e 330cm da seção E20+15 teve de ser arrancada, re-espalhada e re-compactada após a ocorrência de chuvas intensas. Por isso, observa-se, que há uma redução nos deslocamentos na Figura 136.

O acompanhamento da instrumentação da seção E20+15 foi bastante prejudicado por atos de vandalismo, em duas ocasiões diferentes, que destruíram os *tell-tales* TT2 e TT12 e danificaram os *tell-tales* TT5, TT7 e TT11.

A construtora lançou, por engano, uma camada de solo de uma jazida de fora do lago entre as alturas de 130 e 150cm. Esta camada foi arrancada e substituída por outra de solo proveniente do fundo do lago. Provavelmente por isto, as leituras indicadas na Figura 139 apresentam um certo distúrbio entre as alturas de 130 e 150cm.

Nesta mesma seção, foi necessário gradear e recompactar a camada de 230 a 250cm que foi atingida por chuvas intensas.

Constatou-se que, apesar das geogrelhas e dos tubos de *tell-tale* serem presos à camada de solo subjacente por grampos metálicos, não raro ocorriam enrugamentos nas grelhas ou deslocamentos nos fios e nos tubos quando do espalhamento de solo com trator de esteiras, conforme indicado na Figura 84. Por isto, optou-se por tomar a leitura inicial de referência após o espalhamento da primeira camada de solo sobre a geogrelha recém instrumentada. A leitura seguinte era tomada logo após a compactação da referida camada.

Entretanto, o caso da geogrelha da seção E20+15, na altura de 40cm, é diferente. A geogrelha foi instrumentada ao final da tarde de um sábado. Não havia mais luz natural para lançar a próxima camada e a administração da obra informou que o serviço seria finalizado na segunda-feira. Apesar disto, o serviço prosseguiu no domingo, com a compactação de três camadas sem que fosse tomada nenhuma leitura. Na segunda-feira de manhã, quando foi tomada a segunda leitura o muro já se encontrava na altura de 110cm.

Pelo que se observa da Figura 136, entretanto, não ocorreram diferenças consideráveis entre as citadas leituras.

Durante a construção do muro, quando não se realizava leituras logo após a instalação dos *tell-tales* em alguma geogrelha, por motivos práticos, as leituras

eram tomadas a qualquer momento, indiferentemente da camada mais elevada já ter sido compactada ou não. Como regra geral, optou-se por considerar a altura correspondente a uma camada somente após a sua compactação com rolo.

O comportamento dos *tell-tales* da seção E33+12 na altura de 190 cm, apresentado na Figura 140, é estranho, pois sugere que o muro recuou. Entretanto, este comportamento não é verificado pelas leituras dos marcos topográficos (especialmente do marco M8), apresentadas a seguir.

As Figuras 142, 143 e 144 apresentam a distribuição dos deslocamentos medidos na seção E20+15, ao longo do comprimento das geogrelhas, em diferentes momentos. Cada momento é representado pela altura de muro construída.

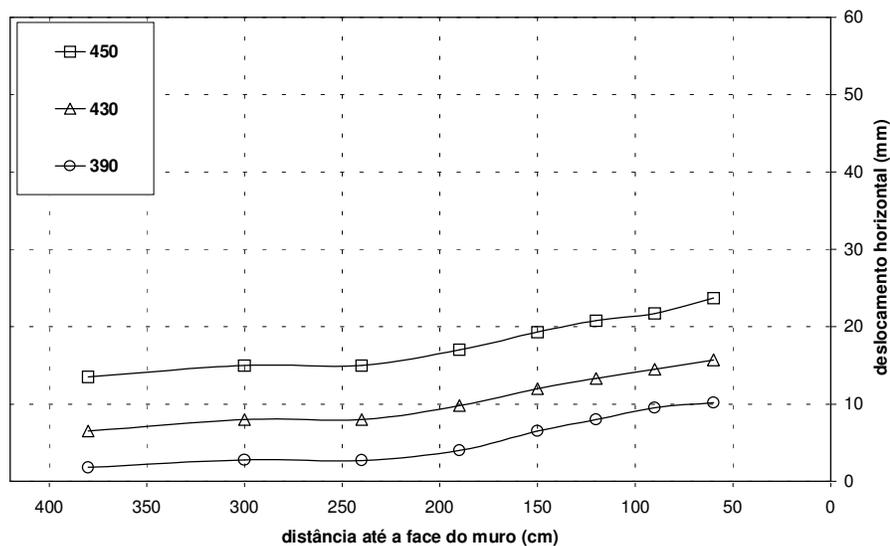


Figura 142 – Distribuição dos deslocamentos horizontais na geogrelha de 370cm de altura, seção E20+15.

Os deslocamentos medidos na geogrelha de 370cm de altura, apresentados na Figura 142, aumentam gradualmente em direção à face e a forma da distribuição é a mesma para os *tell-tales* nas três alturas de muro representadas.

Pode-se observar, na Figura 143 que o TT12, que foi instalado a 310cm da face, não está representado, pois sofreu vandalismo, conforme relatado anteriormente. O *tell-tale* TT11, localizado a 250cm da face, apresenta leituras incoerentes, como se o trecho final da geogrelha estivesse sob compressão. Estas leituras estão destacadas por um retângulo.

Novamente, a forma da distribuição de deslocamentos não se altera, durante todas as etapas de construção representadas.

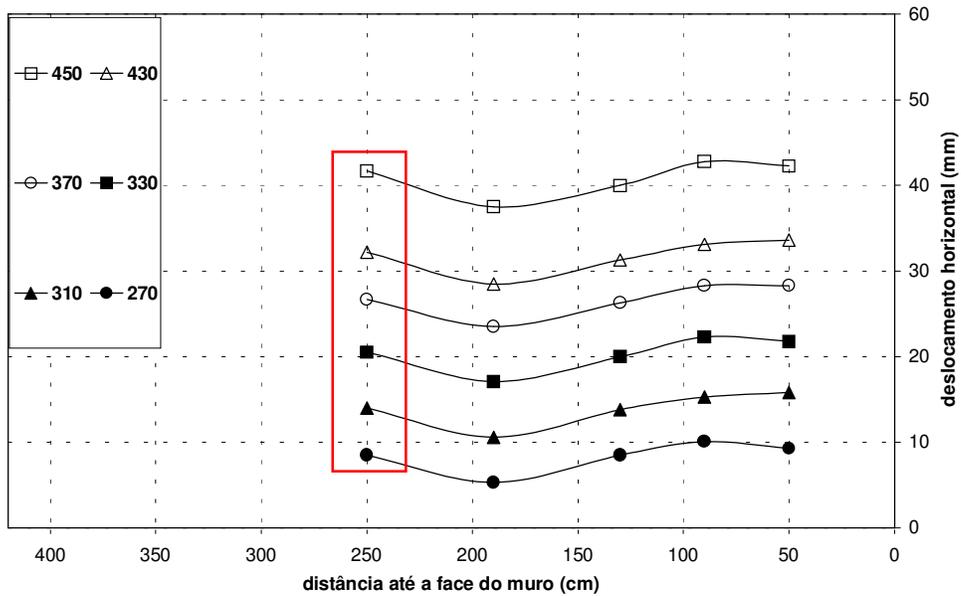


Figura 143 – Distribuição dos deslocamentos horizontais na geogrelha de 190cm de altura, seção E20+15.

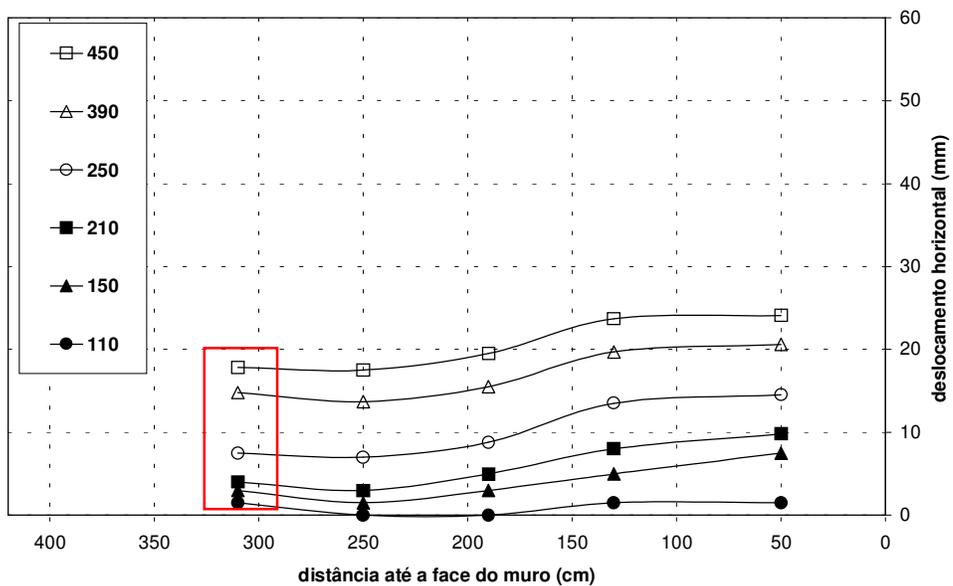


Figura 144 – Distribuição dos deslocamentos horizontais na geogrelha de 40cm de altura, seção E20+15.

Na Figura 144, que representa a distribuição de deslocamentos da geogrelha de 40cm de altura, observa-se que o *tell-tale* TT2, que foi instalado a 90cm da face, não está representado pois também sofreu vandalismo. O *tell-tale* TT6, localizado a 310cm da face, apresenta leituras incoerentes, a exemplo do *tell-tale* TT11, como se o trecho final da geogrelha estivesse sob compressão.

É possível que tenha ocorrido um erro na primeira leitura que se reflete nas leituras seguintes do TT12. Entretanto, acredita-se que boa parte das incoerências constatadas nas leituras seja causada pela estrutura de suporte do equipamento de leitura dos *tell-tales*. O projeto inicial previa que a estrutura de suporte do equipamento de leitura fosse construída em cantoneiras de aço soldadas, tendo em vista que movimentações da referida estrutura influiriam nos deslocamentos medidos dos *tell-tales*.

Entretanto, devido à restrições para trabalhos em solda no local da obra, foi necessário utilizar andaime de quadros encaixáveis. Este tipo de andaime diminuiu sensivelmente a rigidez global da estrutura, apesar do esforço em contraventar as peças.

Devido à reduzida rigidez, parte dos deslocamentos medidos pode ser devida a deformações da estrutura de suporte do equipamento de leitura, ao invés de movimentos da massa de solo reforçado, reduzindo a confiabilidade das leituras dos *tell-tales*.

Outra possível fonte de leituras espúrias são as dobras que as geogrelhas podem ter sofrido devido à passagem de tratores, durante o processo de espalhamento do solo.

Entretanto, cabe ressaltar que os deslocamentos horizontais medidos nos *tell-tales* próximos da sacaria são bastante próximos dos valores medidos pelos marcos topográficos instalados em alturas próximas, como será visto a seguir.

8.3. Resultados dos marcos topográficos

A Figura 145 e a Figura 146 apresentam os resultados dos deslocamentos dos marcos topográficos da face do muro, ao longo da construção, obtidos por

meio de topografia, nas duas seções de estudo. Também é indicada a altura de instalação de cada marco.

Os deslocamentos da face, obtidos por topografia, são da ordem de grandeza dos deslocamentos internos, medidos por *tell-tales*.

Cabe ressaltar, entretanto, que as medidas por topografia foram prejudicadas por não se contar com uma equipe específica para esta tarefa no campo.

A passagem dos equipamentos de compactação, especialmente os “sapos”, produzia grandes deslocamentos horizontais na sacaria adjacente à camada que está sendo compactada. Os marcos eram colocados na face imediatamente após o lançamento de uma camada de solo e antes da passagem dos equipamentos de compactação. A primeira leitura de cada marco, entretanto, dependia da disponibilidade da equipe de topografia. Em alguns casos a primeira leitura do marco ocorreu um dia após sua colocação, quando a camada já havia sido compactada e outra estava sendo lançada. Isto explica as discrepâncias nos trechos iniciais da curva de deslocamentos dos vários marcos. Os marcos M2, M4, M7, M8 e M9 foram afetados pelo problema.

Nos casos em que a primeira leitura do marco topográfico foi realizada antes da passagem dos equipamentos de compactação o trecho inicial do gráfico apresenta grandes deslocamentos horizontais, conforme se observa na Figura 145 e na Figura 146. Ao contrário, se a primeira leitura for feita após a passagem dos equipamentos de compactação, o trecho inicial da curva apresentará deslocamentos menores.

A Figura 147 e a Figura 148 apresentam o perfil de deslocamentos da face do muro após a construção de 450cm de altura, para as seções E20+15 e E33+12. Os marcos M2, M4, M7, M8 e M9 estão representados por símbolos vazados.

Tendo em vista que os marcos M3 e M8 foram instalados na mesma altura, tentou-se corrigir a leitura de M8, tomando-se por base as proporções entre as leituras de M3. Os deslocamentos ocorridos durante a compactação das duas primeiras camadas sobre M3 representam, aproximadamente, 62% do deslocamento total. Como o erro na medição de M8 ocorreu na primeira leitura, não afetando os valores relativos das leituras seguintes, considerou-se que os deslocamentos ocorridos a partir da terceira camada em M8 representariam 38% do deslocamento horizontal total.

Sendo assim, o deslocamento horizontal corrigido de M8 seria de 39,8mm.

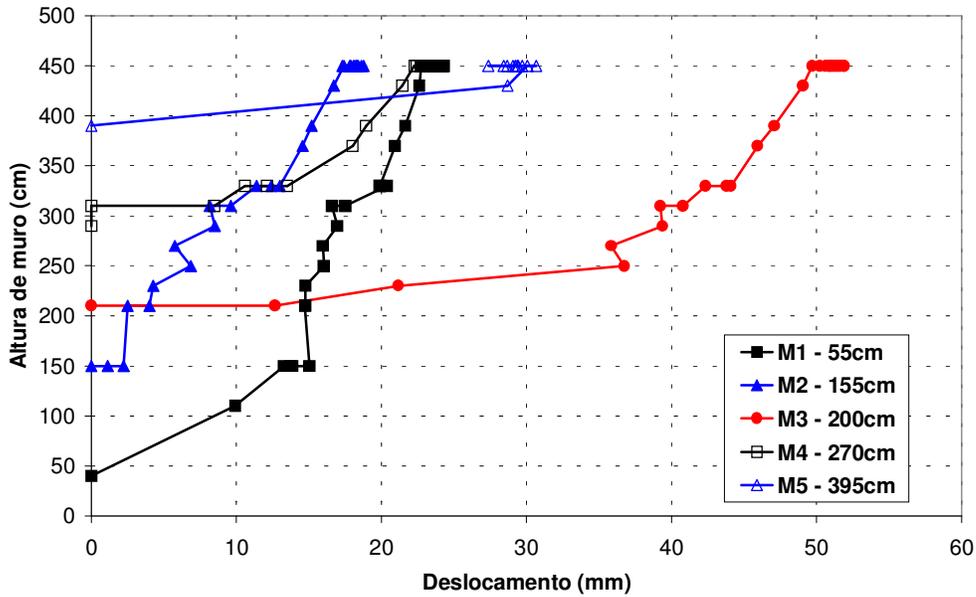


Figura 145 - Deslocamentos horizontais dos marcos topográficos em função da altura de muro na seção E20+15.

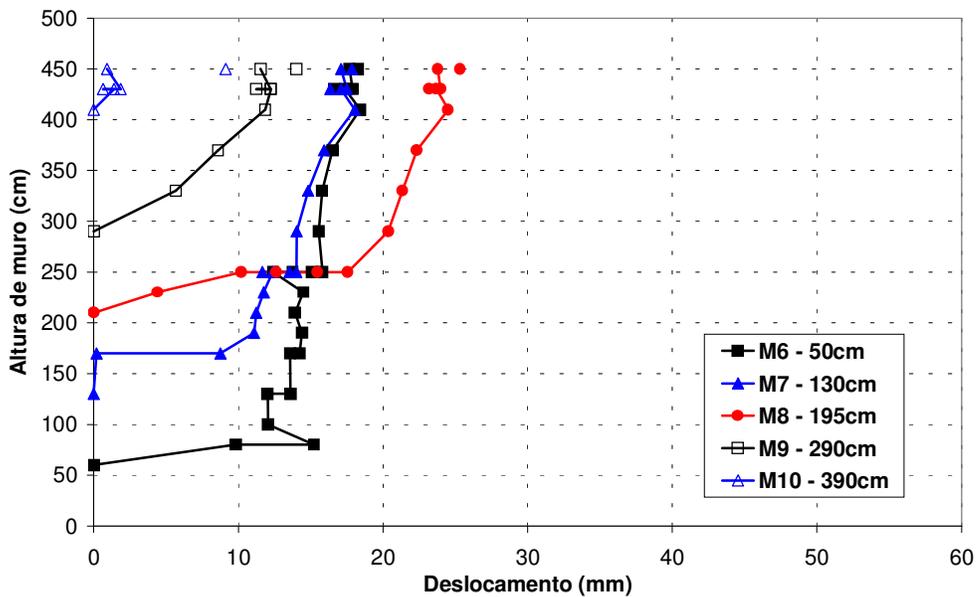


Figura 146 - Deslocamentos horizontais dos marcos topográficos em função da altura de muro na seção E33+12.

Os deslocamentos horizontais considerados confiáveis, nas duas seções instrumentadas, são apresentados na Figura 149, sendo o deslocamento corrigido de M8 representado por um quadrado vazado. Também é apresentada uma proposta de curva de ajuste para os dados.

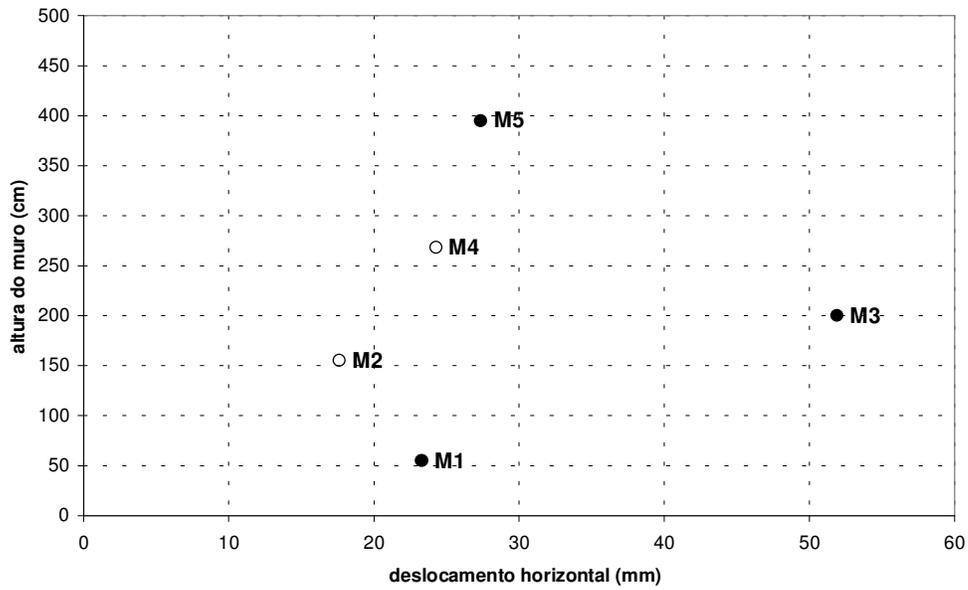


Figura 147 - Perfil de deslocamentos horizontais dos marcos topográficos em função da altura de muro na seção E20+15.

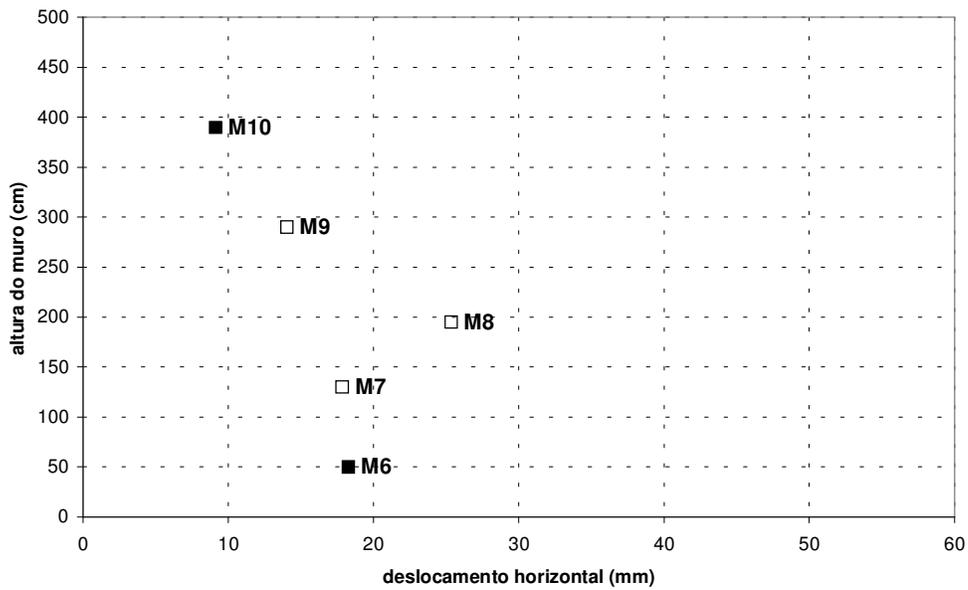


Figura 148 - Perfil de deslocamentos horizontais dos marcos topográficos em função da altura de muro na seção E33+12.

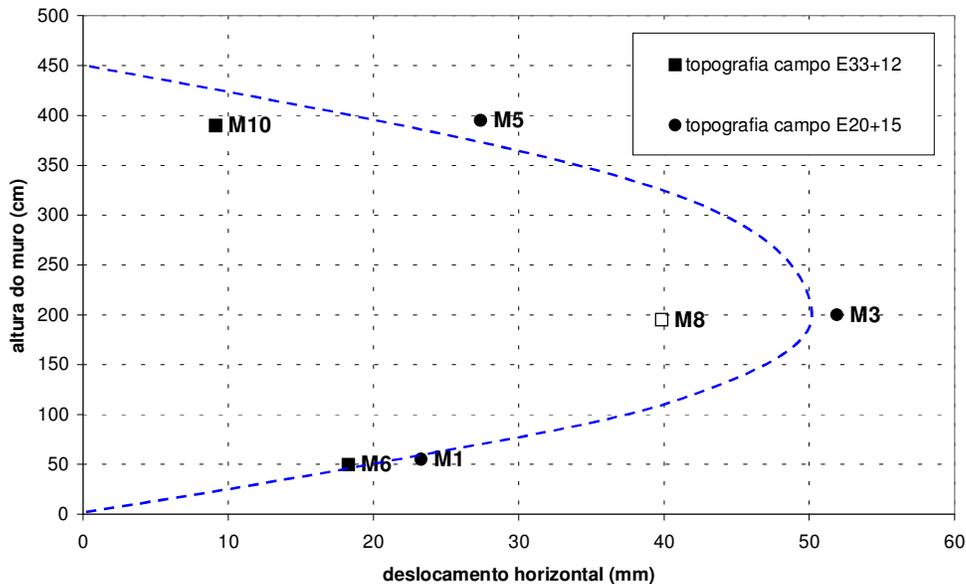


Figura 149 – Deslocamentos horizontais da face obtidos por topografia, nas duas seções instrumentadas.

O formato do perfil de deslocamentos horizontais apresentado na Figura 149 é bastante semelhante aos perfis de deslocamentos obtidos por Tsukada et al. (1998) e Bathurst et al. (2002), conforme demonstrado no Capítulo 2.

O deslocamento horizontal máximo medido na face, 53,1mm, equivale a 1,1% da altura construída. Este valor é compatível com outros reportados na literatura. Bathurst et al. (2002) e Tsukada et al. (1998) obtiveram, respectivamente, 1,5% e 0,9% da altura.

Utilizando-se a correlação empírica proposta por Elias et al. (2001), para estimar o deslocamento horizontal máximo, obtêm-se um valor de 45mm. A Figura 150 compara a correlação dos autores ao valor de deslocamento horizontal máximo medido na face, mostrando boa concordância.

Utilizando-se a formulação e os ábacos propostos por Jewell e Milligan (1989) para o cálculo do deslocamento horizontal máximo, obtêm-se um valor de 43,1mm para o muro em questão. Cabe ressaltar que, para obter este valor, foi tomada uma média ponderada das rigidezes dos dois tipos de geogrelhas utilizados no muro, igual a 1060kN/m. Também foram utilizadas a média ponderada dos espaçamentos verticais, igual a 53cm, e uma sobrecarga de 104kPa, igual ao carregamento estático equivalente do rolo compactador vibratório.

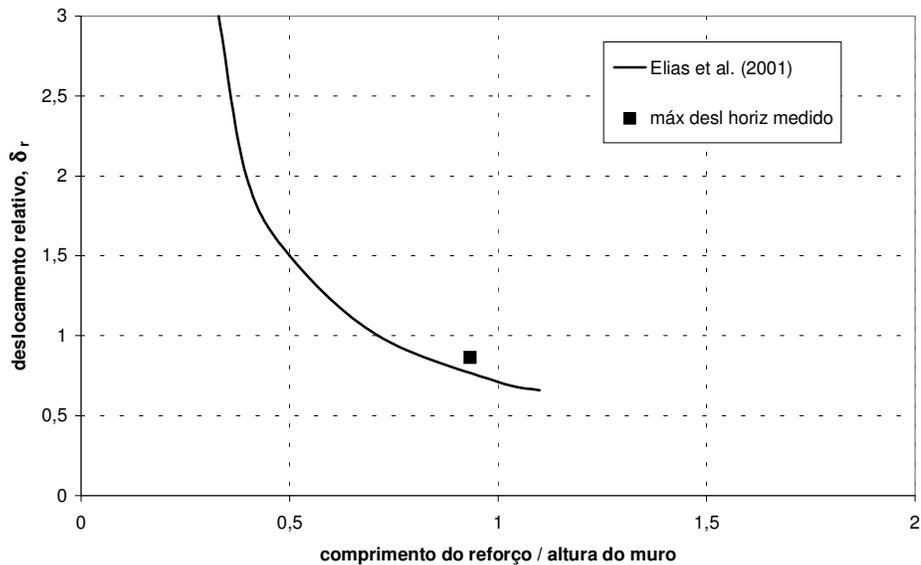


Figura 150 – Comparação entre o deslocamento horizontal máximo medido na seção E20+15 e a correlação proposta por Elias et al. (2001).

8.4. Testes de sobrecarga

Para verificar o comportamento das seções instrumentadas foi realizado um teste de sobrecarga em cada seção, após a construção do muro reforçado.

Tendo em vista as dificuldades de providenciar carregamentos de magnitude adequada para um teste em escala real optou-se por, inicialmente, posicionar um caminhão carregado com carga máxima de solo, sobre cada seção, conforme indicado na Figura 151, e acompanhar os deslocamentos por doze horas.

Foram empregados caminhões de três eixos, modelo 6 x 4 tracionado, com a caçamba basculante completamente ocupada pelo solo utilizado na obra. O peso estimado de cada veículo carregado é de 380kN.

Constatou-se, ao final das doze horas de teste, que os telltales, marcos topográficos e caixas suecas não indicaram nenhum deslocamento nas seções.

A ausência de deslocamentos mensuráveis deve-se provavelmente ao fato de as seções já terem sido submetidas a carregamentos maiores que a sobrecarga do caminhão, durante a construção.

Somente para efeito de comparação, distribuindo-se o peso do caminhão carregado pela sua área em planta, obtêm-se uma sobrecarga de, aproximadamente, 20kPa. A sobrecarga equivalente devido à compactação é da ordem de 100kPa, conforme será descrito mais adiante.

Por falta de meios para se aplicar carregamentos mais elevados, não foram realizados outros testes de sobrecarga.



Figura 151 – Ensaio de sobrecarga com caminhão carregado na seção E20+15.

8.5. Considerações finais

Foram instaladas caixas suecas na base das duas seções instrumentadas, para avaliar os recalques sofridos durante a construção. Não foram constatados recalques diferenciais apreciáveis na base do muro de solo reforçado, conforme as medições efetuadas. A diferença entre as medições obtidas nas duas seções

provavelmente foi causada pela variabilidade natural do material compactado na base dos muros.

Para medir os deslocamentos internos da massa de solo reforçado foram instalados *tell-tales* nas geogrelhas de 40cm, 190cm e 370cm de altura. A forma das curvas de distribuição de deslocamentos ao longo das geogrelhas, medidas por *tell-tales*, não variou significativamente ao longo da construção do muro.

Apesar de algumas leituras terem sido prejudicadas, em função de atos de vandalismo e deficiências da estrutura de suporte do equipamento de leitura dos *tell-tales*, as leituras dos *tell-tales* mais próximos da face apresentam razoável concordância com as medições dos marcos topográficos correspondentes.

Foram instalados marcos topográficos na face das duas seções instrumentadas do muro para acompanhar seus deslocamentos horizontais durante a construção. A falta de uma equipe de topografia dedicada à tarefa de medição dos marcos prejudicou as leituras iniciais de alguns marcos.

O perfil de deslocamentos obtido a partir dos marcos que não foram afetados mostra boa concordância com outros perfis apresentados na literatura. O valor do deslocamento horizontal máximo medido na face também é próximo aos valores reportados por outros autores.

Foram realizados testes de sobrecarga nas seções instrumentadas, após a conclusão do muro, para avaliar as deformações devido à sobrecarga. Entretanto, não houve deslocamentos mensuráveis, devido provavelmente ao esforço de compactação, durante a construção do muro, ser bastante superior à sobrecarga aplicada.

Esta conclusão está em concordância com o trabalho de Cousens e Pinto (1996). Segundo os autores, a compactação atua como um importante pré-adensamento do solo, reduzindo as deformações no período pós construtivo.