

Protótipo de Muro de Solo Envelopado com Geotêxtil para Fins Didáticos

Samira Tassarolli de Souza

Escola de Engenharia de São Carlos EESC-USP, São Carlos, Brasil, samira.tsouza@gmail.com

Yara Barbosa Franco

Escola de Engenharia de São Carlos EESC-USP, São Carlos, Brasil, yarabf@usp.br

Sergio Arturo Rincón Barajas

Escola de Engenharia de São Carlos EESC-USP, São Carlos, Brasil,
sergiorincon_12_23@hotmail.com

Clever Aparecido Valentin

Escola de Engenharia de São Carlos EESC-USP, São Carlos, Brasil, cclever@sc.usp.br

Jefferson Lins da Silva

Escola de Engenharia de São Carlos EESC-USP, São Carlos, Brasil, jeffersonlins@gmail.com

RESUMO: As obras geotécnicas, principalmente as de contenção, necessitam da estimativa do valor do empuxo de terra. Sobre empuxo de terra entende-se que este é o resultado das solicitações do solo sobre as estruturas que interagem com os maciços terrosos ou forças que se desenvolvem no interior desses maciços. Neste contexto, o objetivo deste trabalho consiste em analisar o comportamento por meio de modelos reduzidos de um solo do tipo areia argilosa com vestígio de silte, compactado em forma de muro, com e sem reforço interno, solicitado por uma sobrecarga. O reforço foi introduzido envelopando o solo com geossintético do tipo geotêxtil não-tecido. Aplicou-se uma sobrecarga vertical na superfície do solo contido pelo muro e através de LVDTs devidamente posicionados na face e células de tensão total localizadas no interior do muro, obtiveram-se, respectivamente, os deslocamentos frontais das camadas do muro e o acréscimo de tensão horizontal transmitida ao solo devido à sobrecarga. Os resultados obtidos permitiram observar, na prática, os benefícios da introdução de um reforço geossintético em um muro de contenção, cujo comportamento mecânico melhorou tanto em termos de tensões suportadas quanto de deslocamentos da face. Os modelos confeccionados deverão ser utilizados para compor um novo aparato do Laboratório de Geossintéticos da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP) que está sendo desenvolvido para ilustrar e elucidar o ensino de Mecânica dos Solos para alunos do curso Engenharia Civil. Sendo assim, este trabalho além de técnico possui objetivos didáticos e, para isso, foi desenvolvido um procedimento experimental simples com a intenção de facilitar a reprodução deste ensaio para os futuros alunos da disciplina Mecânica dos Solos.

PALAVRAS-CHAVE: Muro de Solo Envelopado, Geotêxtil, Modelo Didático.

1 INTRODUÇÃO

No ensino de Mecânica dos Solos para alunos de graduação em Engenharia Civil são apresentadas diferentes estruturas de muro de contenção, inclusive estruturas de solo reforçado. O projeto destas obras geotécnicas necessita da estimativa do valor do empuxo de terra. Sobre empuxo de terra entende-se que este é o resultado das solicitações do solo sobre as estruturas que interagem com os maciços terrosos ou forças que se desenvolvem no interior desses maciços.

Devido à aplicação dos geossintéticos ser recente na engenharia em comparação a outros materiais, percebe-se nos graduandos a inexperiência com projetos de estruturas de solo reforçado, cuja aplicabilidade vem crescendo cada dia mais.

A fim de possibilitar uma experiência prática aos alunos, foi desenvolvido um modelo reduzido para complementar o processo de aprendizagem e elucidar os conceitos teóricos envolvidos em um muro de contenção de solo envelopado com geotêxtil, deixando claro o ganho de resistência deste quando comparado a um muro com mesmas características geométricas, físicas, mecânicas e hidráulicas, porém sem nenhum tipo de inclusão.

A norma brasileira NBR ISO 10318:2013 define geossintético como um produto industrializado que possui polímero sintético ou natural em sua composição e pode ser encontrado em diversos formatos como de grelhas, tiras e mantas. Encontra aplicação em obras de engenharia geotécnica e civil, podendo estar em contato com o solo ou com outros materiais.

O geotêxtil corresponde a uma das possíveis classificações para geossintéticos e conforme a NBR ISO 10318:2013 ele é um material têxtil plano e permeável, podendo ser subdividido em tecido ou não tecido. Possui como funções em uma obra: separação, proteção, filtração, drenagem, reforço e controle de erosões.

O processo de execução de um muro de solo envelopado com geotêxtil se inicia pela camada base, onde toda a extensão do muro é nivelada e compactada. Em seguida, uma manta de geotêxtil é estendida e nova camada de solo é

inserida, compactada e nivelada. Na face, onde essa camada ficaria exposta, é realizada uma dobra com o geotêxtil colocado anteriormente, com o intuito de envelopar o solo. Todo processo é executado diversas vezes até que se atinja a altura prevista em projeto.

Após executada a estrutura, obtém-se um grande maciço de solo com geotêxtil: o muro envelopado com geossintético. Este muro resiste, por gravidade e atrito nas interfaces solo/geossintético, a toda pressão exercida pelo maciço adjacente que não foi reforçado. A essa pressão horizontal denominamos empuxo.

Neste sentido, no modelo reduzido proposto neste trabalho foi inserida instrumentação adequada para explorar resultados como deslocamentos, tensões e deformações que complementam a aprendizagem.

2 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

2.1 Solo

Em pesquisa realizada no Laboratório de Geossintéticos da EESC-USP, foi coletado e realizado o peneiramento do solo escolhido para a retirada da fração grossa correspondente aos pedregulhos. Posteriormente, foram realizados os ensaios de caracterização e resistência do solo utilizado no presente estudo.

A jazida do material escolhido (ver Figura 1) localiza-se na abscissa k154+800 da rodovia Luiz Augusto de Oliveira (SP-215), sentido São Carlos – Ribeirão Bonito. Sua classificação corresponde a uma areia argilosa (SC) e a uma areia argilosa com vestígio de silte, segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) e a norma brasileira NBR 6502:1995, respectivamente.



Figura 1. Solo utilizado.

A seguir, é mostrada na Figura 2 a curva de distribuição granulométrica e na Tabela 1 as propriedades geotécnicas do solo.

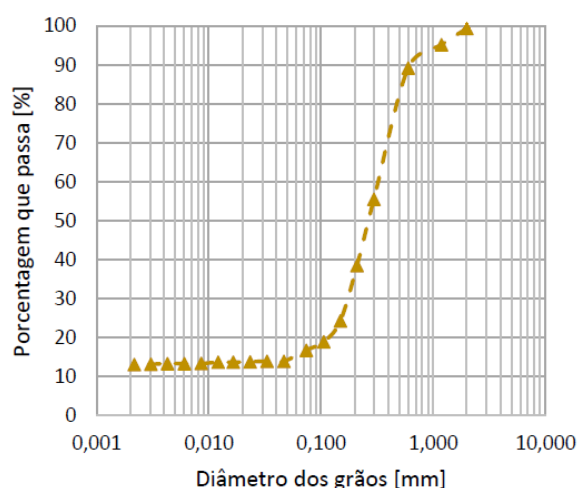


Figura 2. Distribuição granulométrica do solo.

Tabela 1. Propriedades geotécnicas do solo.

Ensaio	Parâmetro	Valor
Massa específica dos sólidos	ρ_s [g/cm ³]	2,646
Limites de consistência	w_L [%]	16
	w_P [%]	14
	I_p [%]	2
Proctor normal	$\rho_{d \text{ máx}}$ [g/cm ³]	1,983
	w_{ot} [%]	9,24
	S_r [%]	73
Ensaio Triaxial CD	ϕ [°]	31,2
	c [kPa]	34,24

Para a execução do ensaio triaxial utilizou-se amostras deformadas, onde cada corpo de prova foi preparado com grau de compactação de 100% e teor de umidade ótimo. As tensões de

confinamento aplicadas foram de 100, 200 e 400 kPa.

2.2 Geotêxtil

O material utilizado para reproduzir o geotêxtil não-tecido nos modelos reduzidos testados foi uma manta polimérica de poliéster (Figura 3) de reduzida massa por unidade de área, comercialmente conhecida por *Pellon Sew-in* e produzido pela *Pellon Division of Freudenberg Nonwovens*. Este mesmo material foi utilizado com sucesso por Costa (2004) para simular geotêxteis não-tecidos em modelos reduzidos e segundo a autora ele reproduz bem as características destes materiais. Por esse motivo no presente estudo o material utilizado será referenciado por geotêxtil.



Figura 3. Material utilizado como geotêxtil no estudo.

Primeiramente, realizou-se o preparo dos corpos de prova de acordo com a NBR ISO 9862:2013. Como se trata de um material com valor de massa por unidade de área muito pequeno, foram utilizados corpos de prova que não apresentavam nenhum tipo de defeito perceptível visualmente e ensaiados somente na direção longitudinal (maior resistência), disposição na qual os reforços iriam ser dispostos no protótipo de muro de solo envelopado.

Em sequência, foi realizada a caracterização física, começando pela determinação da espessura como recomenda a NBR ISO 9863-1:2013. Após essa etapa, determinou-se a massa

por unidade de área (também conhecida por gramatura), por ensaios que seguiram a NBR ISO 9864:2013.

Com relação à resistência mecânica do geotêxtil foi realizado o ensaio de tração, conforme a NBR ISO 10319:2013.

Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Geossintéticos da EESC-USP e os resultados são apresentados na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3. Caracterização física e mecânica do geotêxtil.

	Força [N]	Deformação específica [%]	Força/ Largura [N/mm]	Massa/ Área [g/m ²]
Média	86,01	7,424	0,5764	22,17
CV [%]	7,472	15,96	39,81	0,66
DP	6,43	1,18	0,23	0,14

CV = coeficiente de variação e DP = desvio padrão

2.3 Aparelhagem e instrumentação

Para a aplicação da sobrecarga sobre os modelos reduzidos utilizou-se uma Máquina Universal de Ensaio da Marca EMIC modelo DL3000 equipada com uma célula de carga de 30 kN. A velocidade de aplicação da sobrecarga foi ajustada para 2 mm/min, por se considerar ser essa uma velocidade pequena o suficiente para se considerar o carregamento como quase estático.

Em relação à instrumentação, as medidas de deslocamento da face foram adquiridas por meio de dois transdutores de deslocamento do tipo LVDT de curso total de 50 mm. O acréscimo de tensões horizontais internas foram obtidas com a utilização de 4 células de tensão total da marca KYOWA de capacidade máxima de 200 kPa cada.

Foi utilizado um aquisitor de dados da marca VISHAY modelo WIN 5000 equipado com cartões de leitura para transdutores resistivos.

2.4 Caixa de ensaios

Construiu-se uma caixa em madeira de dimensões internas 35 x 50 x 38,5 cm, com as faces superior e frontal abertas (Figura 4). As

três faces laterais foram revestidas com tecido de fibra de vidro revestido com PTFE (teflon) com adesivo em uma das faces, que foi fixado com objetivo de reduzir o atrito lateral na interface solo-caixa. A caixa foi ainda equipada com uma barra roscada presa por porcas para evitar o empenamento das faces laterais, que poderia ocorrer conforme aplicação da sobrecarga.



Figura 4. Caixa de ensaios

3 METODOLOGIA

3.1 Preparação dos ensaios

Para a preparação do solo a ser utilizado nos ensaios primeiramente foi feito o ajuste da umidade ótima (Tabela 1) e homogeneização em uma betoneira.

Definiu-se o grau de compactação do solo em 90%, pois concluiu-se ser este suficiente para impedir que, ao aplicar o carregamento sobre o solo, o recalque no local de aplicação fosse muito elevado, acelerando a ocorrência da ruptura. Para obtenção de graus de compactação superiores, seria preciso realizar um processo de compactação diferente do manual, não sendo viável neste caso, já que se busca uma fácil reprodução do modelo por futuros discentes.

Definiu-se também as dimensões dos muros sem e com reforço, sendo a altura escolhida de 33 cm assentado sobre uma camada de 4 cm de espessura. No caso do modelo com reforço (geotêxtil), adotou-se 11 camadas de 3 cm cada

uma. Para a medição dos acréscimos de tensões horizontais geradas devido ao carregamento vertical, a opção adotada foi instalar pares de células de tensão total em dois níveis, referentes à quarta e à oitava camada (de baixo para cima). Para a medição dos deslocamentos da face frontal do muro, escolheu-se posicionar dois LVDTs, situados a 17 cm e 25 cm da base do muro. Nas Figuras 5 e 6 são apresentados os croquis desenvolvidos para esquematizar as definições e auxiliar no momento da montagem. A identificação das células de tensão total (CT) foi feita segundo a seguinte nomenclatura:

CT_{ij} , onde i refere-se ao nível (altura) da CT no muro e j à posição horizontal da CT em relação à face do muro, por exemplo:

CT_{11} - CT posicionada no primeiro nível (4ª camada) e mais próxima da face do muro;

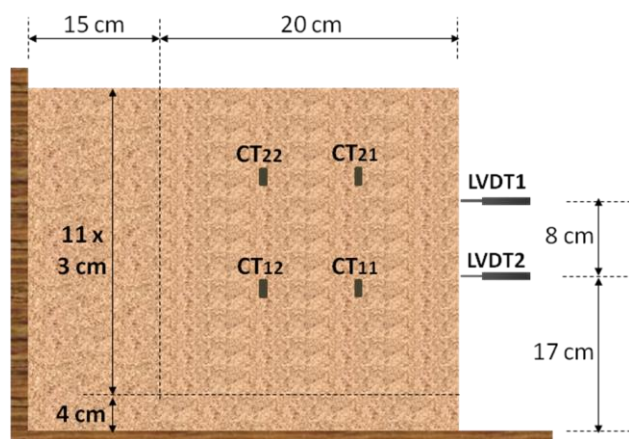


Figura 5. Corte longitudinal da caixa de ensaios (ensaio sem reforço).

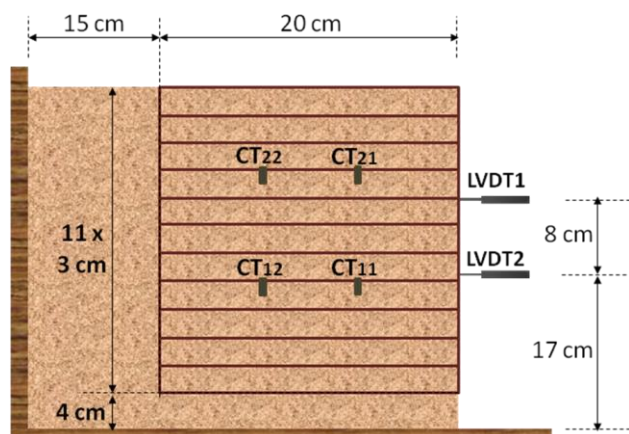


Figura 6. Corte longitudinal da caixa de ensaios (ensaio com reforço).

Calculou-se a massa de solo necessária em cada camada e fez-se marcação da altura correspondente na caixa para auxiliar a compactação, que foi feita manualmente.

Iniciou-se então a montagem do primeiro ensaio. Ressalta-se que todo processo adiante foi realizado duas vezes: uma primeira vez para montagem e execução do Ensaio 1: muro de solo sem reforço, e uma segunda vez, com a única diferença do acréscimo do geotêxtil entre camadas de solo para montagem e execução do Ensaio 2: muro de solo com reforço.

Seguindo o croqui das Figuras 5 e 6 e contando com auxílio de um anteparo removível, inseriu-se a massa referente à camada e compactou-se até atingir a marca de referência. O processo foi repetido, atentando-se para a colocação das células de tensão total ao atingir a altura determinada para as mesmas (Figura 7). Estas foram instaladas após a compactação manual da camada, por meio da abertura de um sulco no local previamente definido para sua colocação. Elas foram posicionadas centralmente, na vertical, com a face receptora de esforços voltada para a face posterior da caixa e com os cabos saindo lateralmente (Figura 7). No caso do ensaio com reforço, a cada camada posicionou-se o geotêxtil cortado de forma que se encaixasse nas laterais, forrando o fundo e deixando uma sobra de aproximadamente 10 cm para posterior envelopamento da camada de solo. Após todas as camadas finalizadas, retirou-se o anteparo e posicionou-se o LVDT nas alturas previstas (Figura 8).



Figura 7. Montagem do modelo sem reforço: solo compactado, células de tensão e anteparo.



Figura 8. Face do modelo com reforço e posicionamento dos LVDTs.

resistiu aos esforços e se rompeu.



Figura 9. Aplicação da sobrecarga na superfície posterior do modelo (muro sem reforço).

3.2 Execução dos ensaios

Posicionada a caixa sob a máquina universal, aplicou-se uma sobrecarga à velocidade constante de 2 mm/minuto, por um aplicador circular de diâmetro 14,9 cm na superfície posterior do modelo. Durante o procedimento, nos ensaios 1 e 2 foram observadas pronunciadas fissuras na superfície (Figura 9). Os limites de execução do ensaio foram, para o Ensaio 1, o deslocamento excessivo da face, que atingiu o curso limite dos LVDTs, e para o Ensaio 2, a ruptura da caixa de ensaios, que após a sobrecarga se tornar muito alta, não

4 RESULTADOS

A seguir são apresentados os gráficos obtidos para os dois ensaios (Figuras 10 e 11) a partir das leituras das células de tensão total e dos LVDTs em função do carregamento aplicado. Foram selecionados apenas os resultados das células do nível inferior nos dois modelos, por serem representativos dos dados obtidos.

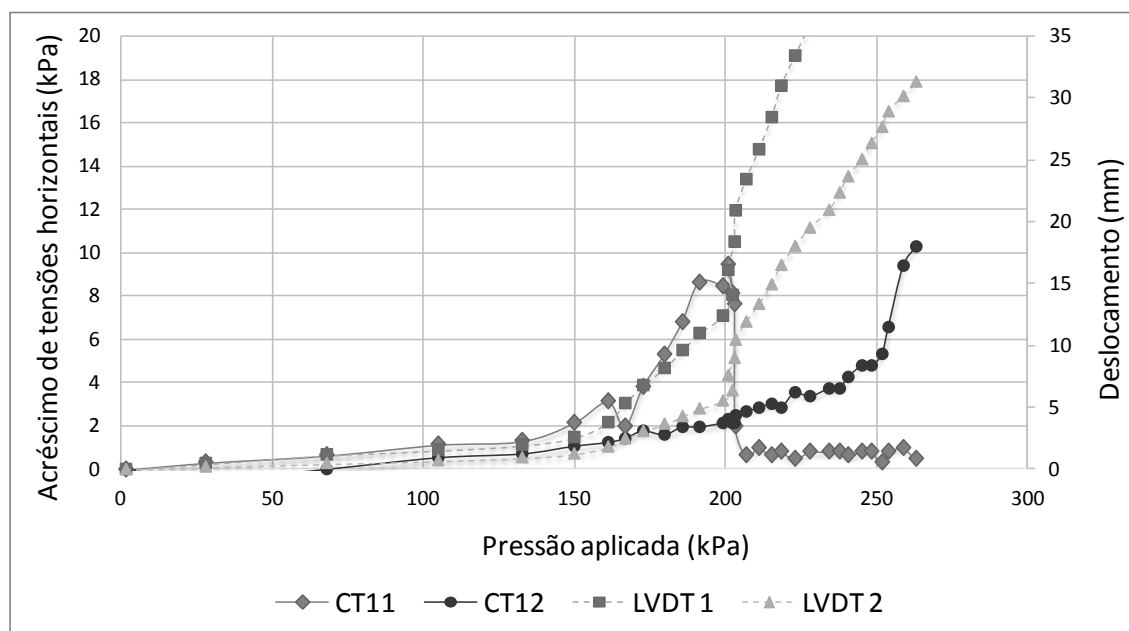


Figura 10. Acréscimos de tensões horizontais e deslocamento da face do muro no modelo sem reforço.

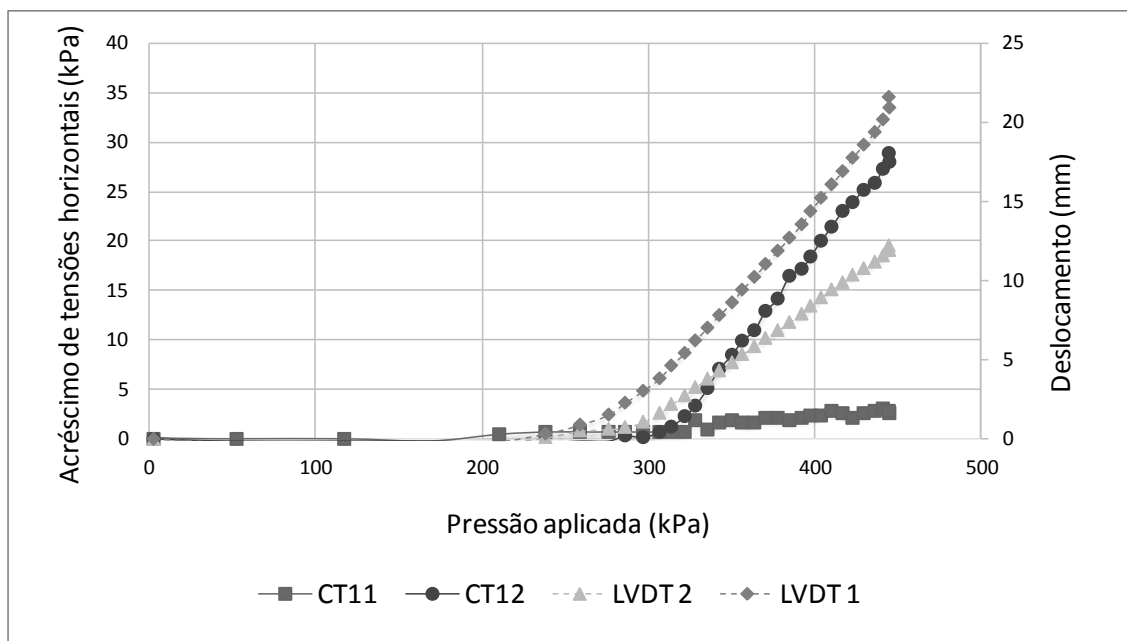


Figura 11. Acréscimos de tensões horizontais e deslocamento da face do muro no modelo com reforço

Observa-se nos gráficos que, tanto para o ensaio sem reforço como para o ensaio com reforço, as leituras dos LVDTs mostram deslocamentos crescentes com o aumento da sobrecarga aplicada, de acordo com o esperado. A diferença entre eles está na magnitude: os deslocamentos observados no ensaio sem reforço foram muito maiores do que os observados no com reforço, mostrando a eficiência da presença do geotêxtil. Essa comparação é melhor apresentada na Figura 12, em que observa-se que o muro reforçado suporta uma sobrecarga maior ao mesmo tempo em que apresenta menores deslocamentos para um mesmo valor de carregamento.

Em relação às leituras das células de tensão total, observa-se que, no primeiro ensaio, ambas, CT₁₁ e CT₁₂, apresentam acréscimos de tensões horizontais crescentes no solo (Figura 10), uma delas atingindo um pico com posterior queda, que coincide com o instante em que surge uma rachadura mais proeminente na superfície do solo. Para o segundo ensaio, um comportamento crescente do acréscimo de tensões horizontais no solo só foi notado a partir de 300 kPa, sobrecarga esta em que no outro ensaio já haviam sido cessadas as aquisições devido ao excessivo deslocamento, mostrando que o solo envelopado suporta sobrecargas muito mais elevadas e que o

acréscimo de tensões horizontais geradas internamente são bem menores.

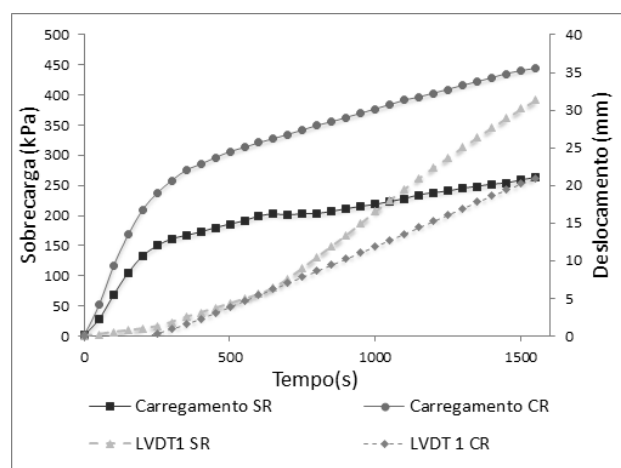


Figura 12. Comparação entre os esforços e os deslocamentos ao longo do tempo nos ensaios sem reforço (SR) e com reforço (CR).

É importante observar que, devido à disponibilidade, foram utilizadas células de tensão total com capacidade máxima de carga (200 kPa) muito superiores ao intervalo de valores observados, que situaram-se entre 0 e 30 kPa. Porém os resultados obtidos permitiram a comparação satisfatória entre os ensaios sem e com reforço, não gerando grandes prejuízos visto que os modelos desenvolvidos têm fins didáticos de aplicação.

Comparando os comportamentos das curvas

de deslocamento da face e das leituras das células de tensão total observa-se uma coincidência do instante de alteração pronunciada da inclinação das curvas, que corresponde a uma sobrecarga aplicada de cerca de 150 kPa para o ensaio sem reforço (Figura 10) e de 280 kPa para o ensaio com reforço (Figura 11). Atribui-se esse aumento abrupto da inclinação à perda de capacidade do sistema de suportar os esforços aplicados, podendo ser este momento considerado como o instante de falha da estrutura. Conclui-se, portanto, que o muro de solo sem reforço suporta uma sobrecarga menor antes da falha do que o muro reforçado com geotêxtil, o que ressalta o papel do geossintético como auxiliar no suporte dos esforços gerados em um muro de contenção.

5 CONCLUSÕES

Para fins didáticos, os modelos desenvolvidos apresentaram resultados esclarecedores. O desempenho do muro sem reforço mostrou-se aquém do com reforço, tanto em deslocamentos, que foram maiores no primeiro ensaio, quanto em termos de sobrecarga suportada, que foi maior no segundo ensaio e ainda em termos de acréscimo de tensões internas, maiores no muro sem reforço.

Com base do procedimento executivo e em resultados tão representativos, espera-se conseguir elucidar o ensino em sala de aula, sendo a metodologia adotada no presente trabalho de fácil reprodução, podendo ser utilizada como ferramenta auxiliar no âmbito do ensino de Mecânica dos Solos.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2013). *NBR ISO 9862: Geossintéticos — Amostragem e preparação de corpos de prova para ensaios*. Rio de Janeiro, 4 p.
- _____. (2013). *NBR ISO 9863-1: Geossintéticos — Determinação da espessura a pressões especificadas - Parte 1: Camada única*. Rio de Janeiro, 5 p.
- _____. (2013). *NBR ISO 9864: Geossintéticos — Método de ensaio para determinação da massa por unidade de área de geotêxteis e produtos correlatos*. Rio de Janeiro, 2 p.
- _____. (2013). *NBR ISO 10318: Geossintéticos — Termos e definições*. Rio de Janeiro, 23 p.
- _____. (2013). *NBR ISO 10319: Geossintéticos — Ensaio de tração faixa larga*. Rio de Janeiro, 11 p.
- Costa, C.M.L. (2004). *Deformações dependentes do tempo em muros de solo reforçado com geotêxteis*. Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos, 362 p.