

Investigação do Dano Mecânico e do Dano aos Raios Ultravioleta em Geotêxteis Expostos a Condições de Campo

Carlos Vinicius dos Santos Benjamim
OBER S.A. Indústria e Comércio

Benedito de Souza Bueno
Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos (USP)

Paulo César Lodi
Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (UNESP)

Jorge Gabriel Zornberg
Civil Engineering Department-GEO, University of Texas at Austin, Austin, Texas, EUA

RESUMO: Foram construídos e instrumentados oito protótipos de estruturas de contenção com 4,0 m de altura e reforçados com geotêxtil tecido e não-tecido. Após a avaliação do comportamento dos protótipos 1 e 8, reforçados com geotêxtil não-tecido (PET) e tecido (PP), respectivamente, foram retiradas amostras de geotêxteis do interior do solo para avaliação dos danos mecânicos. Amostras da face que ficaram expostas também foram retiradas para avaliação da degradação aos raios UV. O solo utilizado na construção desses protótipos foi uma areia média a grossa, com 20% de areia fina. Os resultados mostraram uma resistência maior ao dano mecânico para o geotêxtil não-tecido quando comparado aos resultados obtidos para o geotêxtil tecido. Com relação à exposição UV, o geotêxtil tecido fabricado com PP, em seu sentido longitudinal, apresentou resultados parecidos aos apresentados pelo geotêxtil não-tecido. Entretanto, em seu sentido transversal, a queda em sua resistência à tração foi muito mais acentuada.

PALAVRAS-CHAVE: Solo reforçado, Geotêxtil, Geossintético, Dano Mecânico, Raios UV.

1 INTRODUÇÃO

Os geossintéticos podem sofrer alterações mecânicas durante o período construtivo, seja devido a danos mecânicos ou a ataques químicos e biológicos, tanto do solo como da água subterrânea. Estas podem ocorrer também, em longo prazo, devido à fluência do material e exposição aos raios ultravioletas (UV). Uma apropriada combinação desses fatores deve ser considerada quando é realizada a seleção das propriedades do geossintético para o projeto.

Quando um geossintético é utilizado em uma estrutura de contenção em solo reforçado, é necessário que suas propriedades sejam garantidas para um tempo mínimo especificado em projeto, levando-se em conta todos os fatores que podem alterar suas propriedades.

Uma estimativa da durabilidade de qualquer aplicação utilizando geotêxteis requer um estudo dos efeitos que a construção e o tempo pós-construção afetam nas propriedades funcionais do material. Dentre esses fatores, pode-se listar a estrutura têxtil e polimérica do produto, processo de fabricação, meio químico e físico em que o material será utilizado, local de armazenamento, condições de instalação do material no campo e as diferentes solicitações que o material irá sofrer durante a sua vida útil.

Este trabalho apresenta resultados referentes aos danos mecânicos causados durante a instalação de geotêxteis tecidos e não-tecidos, como também aos danos causados pela exposição às intempéries (exposição prolongada aos raios UV) em duas estruturas de contenção,

com altura individual de 4,0 m, reforçadas com geotêxtil tecido (PP) e não-tecido (PET).

2 REVISÃO DA LITERATURA

Os polímeros apresentam sensibilidades fotodegradativas diferenciadas à luz UV de diferentes comprimentos de onda (λ). Essas variações de sensibilidade são decorrentes das diferenças em suas estruturas moleculares e composições químicas. A região UV pode ser subdividida em três faixas de comprimentos de onda: UV-A (315-400 nm), UV-B (290-315 nm) e UV-C (abaixo de 290 nm). Algumas referências dividem as faixas UV-A e UV-B em 280 nm. A faixa UV-C não alcança o solo terrestre e a faixa UV-B é a principal responsável pelas mudanças fotoquímicas nos polímeros. A sensibilidade máxima de vários polímeros, determinada pelas energias de dissociação de suas ligações químicas, está dentro da região da radiação UV com comprimentos de onda entre 290 e 400 nm. O Polipropileno (PP) possui valor de λ na faixa de 295-345 nm enquanto que o Poliéster (PET) possui λ na faixa de 330-360 nm (AGNELLI 2002).

A degradação com o tempo de amostras expostas é principalmente iniciada pelos raios ultravioletas (UV) da radiação solar, calor e oxigênio, além de outros fatores climáticos como umidade, chuva, óxidos de nitrogênio, ozônio e depósitos do ar poluído. A poluição atmosférica e chuvas ácidas também podem acelerar a degradação por UV (ROLLIN 2004).

De forma geral, a energia da radiação ultravioleta é suficiente para iniciar a ruptura das ligações dentro do polímero, conduzindo a uma subsequente recombinação como, por exemplo, com o oxigênio do ar, ou então iniciando reações em cadeia mais complexas.

Entretanto, na maioria das situações, o geotêxtil é exposto aos raios ultravioleta por um tempo limitado de armazenagem, transporte e instalação, e em seguida é protegido por uma camada de solo ou algum sistema de face.

A compactação também pode acarretar danos aos elementos de reforço (danos mecânicos). Além da compactação, esses danos

também podem ocorrer no armazenamento, transporte e manuseio dos geossintéticos.

Azambuja (1994) define dano mecânico como sendo toda transformação da estrutura do geossintético resultante de esforços ocorridos durante o seu manuseio, instalação e compactação do solo subjacente. O dano mecânico é maior para solos de granulometria grosseira, camadas de solo pouco espessas, mecanização intensa de terraplenagem e energias de compactação mais elevadas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Método construtivo

Para melhorar o conhecimento sobre as estruturas de contenção em solo reforçado com geotêxtil, foram construídos e instrumentados 8 protótipos de estruturas de contenção com 4,0 m de altura cada e reforçadas com geotêxteis tecidos (PP) e não-tecidos (PET). Por possuir um caráter experimental, as estruturas construídas nesta pesquisa não tiveram nenhum sistema de proteção das faces, que ficaram expostas para se avaliar a degradação UV.

Após a avaliação do comportamento dos protótipos 1 e 8, foram retiradas amostras de geotêxteis do interior do solo para avaliação aos danos mecânicos assim como amostras da face que ficaram expostas para avaliação da degradação UV (Figuras 1a e 1b).

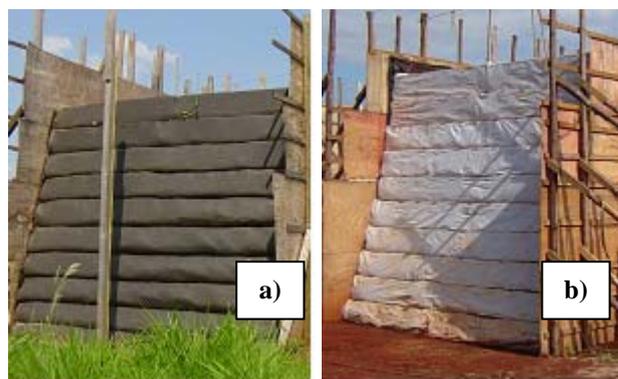


Figura 1. Vista frontal dos protótipos: a) geotêxtil não-tecido (PET) e b) geotêxtil tecido (PP).

As mantas foram perfeitamente esticadas sobre a superfície do aterro para que estivessem sujeitas a estados uniformes de tensão inicial. Sobre a manta de geotêxtil, o solo foi espalhado

com espessura média final de aproximadamente 20 cm por camada, sendo em seguida compactada com uma placa vibratória. Foi utilizada uma placa vibratória da marca Wacker, modelo BPS 1135 W, com dimensões da placa igual a 520 mm (largura) x 350 mm (comprimento), massa igual a 62 kg, frequência vibratória igual a 97 Hz e força centrífuga máxima igual a 11 kN.

3.2 Propriedades do solo

Foram utilizados três solos diferentes, sendo dois coesivos e um granular. O solo utilizado na construção dos protótipos 1 e 8 foi uma areia pura, quartzosa, classificada segundo a NBR 7181 como uma areia média a grossa, apresentando ainda 20% de areia fina (Figura 2).



Figura 2. Curva granulométrica do solo.

A determinação da massa específica dos sólidos foi realizada de acordo com a NBR 6508/84. O valor encontrado para esta areia foi igual a $2,67 \text{ g/cm}^3$. Os índices de vazio máximo e mínimo para o solo arenoso foram obtidos por meio de ensaios de laboratório segundo a MB 3324 e MB 3388, respectivamente. Foi utilizada, na construção dos protótipos uma compactação relativa igual a 80%, resultando em um índice de vazios igual a 0,51. A Tabela 1 apresenta os resultados do ensaio de compactação da areia.

Tabela 1. Resultados dos ensaios de compactação.

$e_{\text{máx}}$	$e_{\text{mín}}$	CR = 80%
0,70	0,46	$e = 0,51$

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento deste solo foram obtidos a partir de ensaios de cisalhamento direto executados no solo seco e ensaio triaxial do tipo consolidado drenado executado com o solo em seu teor de umidade de campo. Os resultados fornecidos pelos ensaios de cisalhamento direto foram $c' = 0 \text{ kPa}$ e $\phi' = 32^\circ$ e, pelos ensaios triaxiais, $c' = 15 \text{ kPa}$ e $\phi' = 32^\circ$.

3.3 Propriedades dos Geotêxteis

Foram utilizados nos protótipos 1 e 8, respectivamente, um geotêxtil não-tecido, de poliéster, fabricado a partir de fibras curtas agulhadas, e um geotêxtil tecido fabricado a partir de fibras de polipropileno. As Tabelas 2 e 3 apresentam os resultados dos ensaios de gramatura e espessura, respectivamente, de cada geotêxtil, juntamente com os coeficientes de variação (c_v). Os ensaios de gramatura foram realizados de acordo com a NBR 12568 e os de espessura segundo a NBR 12569.

Tabela 2. Resultados dos ensaios de gramatura.

geotêxtil	(g/m^2)	c_v (%)
tecido (PP)	204,4	1,20
nãotecido (PET)	166,3	5,15

Tabela 3. Resultados dos ensaios de espessura.

geotêxtil	(mm)	c_v (%)
tecido (PP)	1,26	9,51
nãotecido (PET)	2,66	4,21

3.3 Metodologia para avaliação dos danos

Foram realizados ensaios de tração de faixa larga nos geotêxteis em ambas as direções de fábrica, segundo a NBR 12824. Além da resistência à tração, também foi possível averiguar a variação da deformação na ruptura e a rigidez à tração dos geossintéticos. Foram utilizadas 5 amostras em cada direção para os ensaios realizados com as amostras virgens. Para as amostras degradadas, o número de amostras utilizadas em cada ensaio variou de acordo com a disponibilidade destas.

Com relação às amostras expostas aos raios UV, o período de exposição das amostras de geotêxtil não-tecido (PET) foi de 200 dias com

elevada pluviosidade e altas temperaturas. O geotêxtil tecido (PP) permaneceu exposto por um período mais prolongado, atingindo aproximadamente 1000 dias (3 anos).

4 RESULTADOS OBTIDOS

As Tabelas 4, 5, 6 e 7 apresentam os resultados obtidos para os geotêxteis (resistência última à tração, deformação na ruptura e coeficientes de variação). As Figuras 3, 4, 5 e 6 apresentam as curvas força x deformação de todos os ensaios, juntamente com os valores médios obtidos para cada tipo de amostra danificada.

4.1 Degradação ao dano mecânico

Analisando-se as Figuras 3 e 4, nota-se que a resistência à tração do geotêxtil não-tecido não sofreu variação significativa com a

compactação, variando menos que 2,0% em ambos os sentidos. Isso implica em fatores de redução para a instalação próximos da unidade. Vale ressaltar que, como o geotêxtil utilizado possui uma gramatura relativamente baixa, os geotêxteis com maior gramatura tendem a apresentar fatores de redução ainda mais favoráveis.

Por outro lado, as amostras sofreram um ganho na rigidez à tração, o que é benéfico para este tipo de reforço, rompendo com uma deformação próxima de 55% em ambos os sentidos (consideravelmente menor do que os 95% registrados nas amostras virgens).

Com relação ao geotêxtil tecido, a queda registrada na resistência à tração, devido ao dano mecânico, foi elevada. No sentido longitudinal de fábrica, a queda na resistência última à tração, comparada às amostras virgens, foi de aproximadamente 10%, enquanto que no sentido transversal esta queda chegou a 26%.

Tabela 4. Resultados dos ensaios de resistência à tração no sentido longitudinal com o geotêxtil não-tecido.

Tipo de amostra	Resistência à tração T_{ult} (kN/m)	Deformação na ruptura ϵ_r (%)	Coeficiente de variação c_v (%)	
			Resistência (T)	Deformação (ϵ_r)
Virgem	4,62	94,71	14,34	9,82
Interior do maciço	4,92	56,16	12,70	10,67
Exposta ao tempo	2,59	33,78	12,29	14,05

Tabela 5. Resultados dos ensaios de resistência à tração no sentido transversal com o geotêxtil não-tecido.

Tipo de amostra	Resistência à tração T_{ult} (kN/m)	Deformação na ruptura ϵ_r (%)	Coeficiente de variação c_v (%)	
			Resistência (T)	Deformação (ϵ_r)
Virgem	8,12	95,85	10,42	3,56
Interior do maciço	7,95	54,74	8,25	15,64
Exposta ao tempo	5,10	31,68	20,89	10,34

Tabela 6. Resultados dos ensaios de resistência à tração no sentido longitudinal com o geotêxtil tecido.

Tipo de amostra	Resistência à tração T_{ult} (kN/m)	Deformação na ruptura ϵ_r (%)	Coeficiente de variação c_v (%)	
			Resistência (T)	Deformação (ϵ_r)
Virgem	54,24	27,75	3,91	10,73
Interior do maciço	49,21	16,42	4,25	3,47
Exposta ao tempo	36,18	11,77	7,51	9,38

Tabela 7. Resultados dos ensaios de resistência à tração no sentido transversal com o geotêxtil tecido.

Tipo de amostra	Resistência à tração T_{ult} (kN/m)	Deformação na ruptura ϵ_r (%)	Coeficiente de variação c_v (%)	
			Resistência (T)	Deformação (ϵ_r)
Virgem	13,94	22,67	3,88	10,00
Interior do maciço	10,19	13,81	2,30	5,00
Exposta ao tempo	2,27	3,74	8,50	12,15

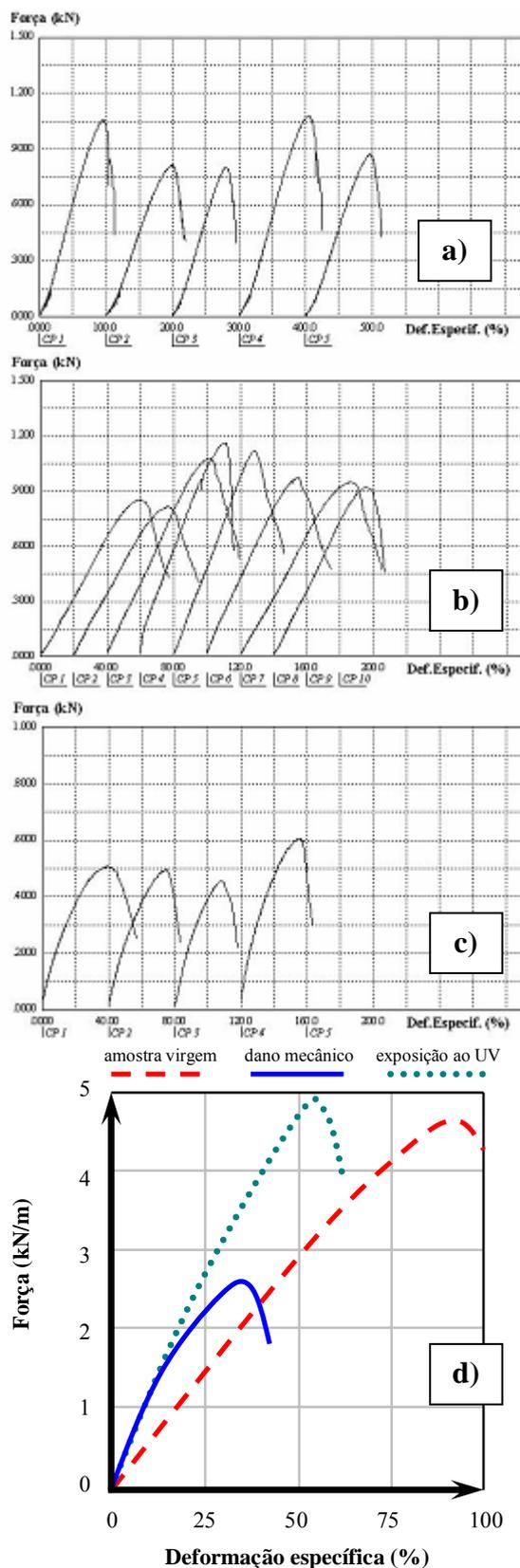


Figura 3. Ensaio de tração realizados no sentido longitudinal de fábrica do geotêxtil não-tecido: a) amostra virgem, b) amostra submetida ao dano mecânico, c) amostra exposta aos raios UV e d) comparação entre os resultados médios de cada ensaio.

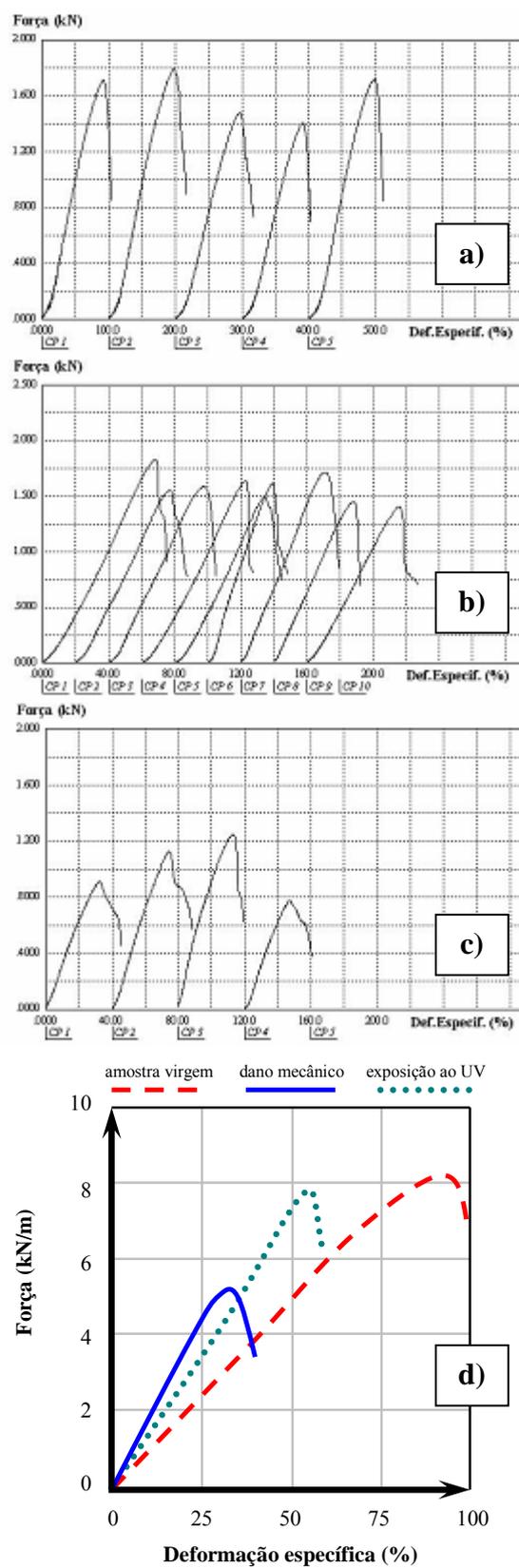


Figura 4. Ensaio de tração realizados no sentido transversal de fábrica do geotêxtil não-tecido: a) amostra virgem, b) amostra submetida ao dano mecânico, c) amostra exposta aos raios UV e d) comparação entre os resultados médios de cada ensaio.

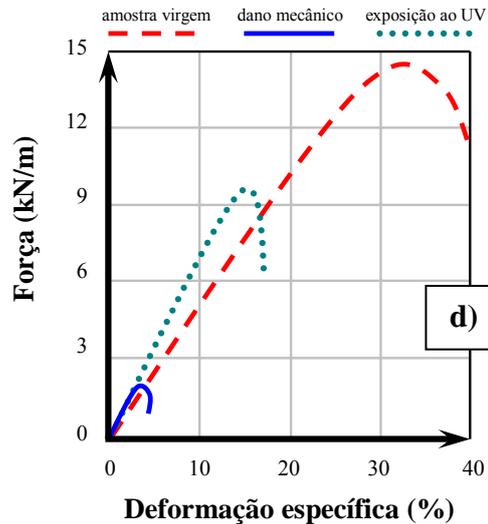
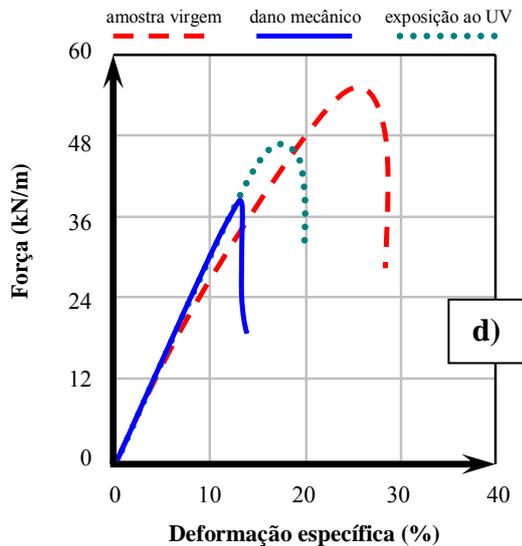
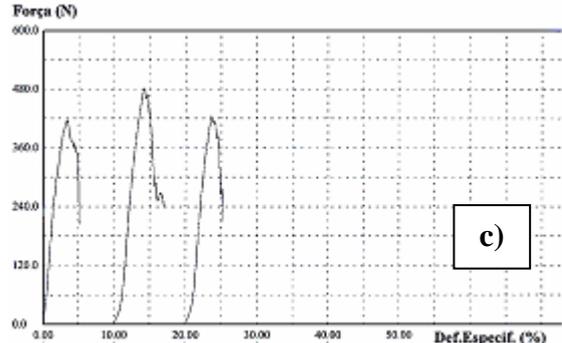
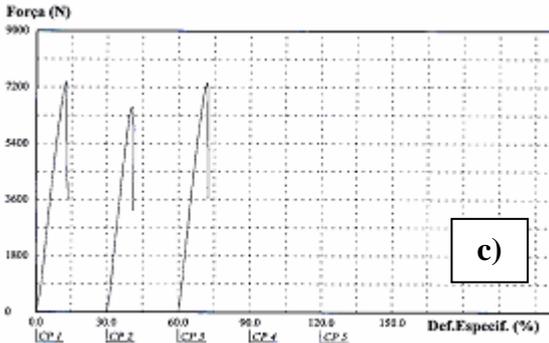
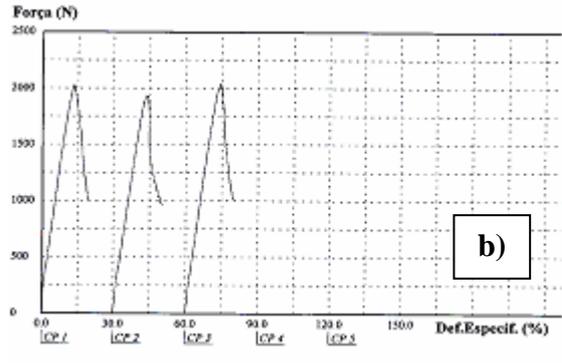
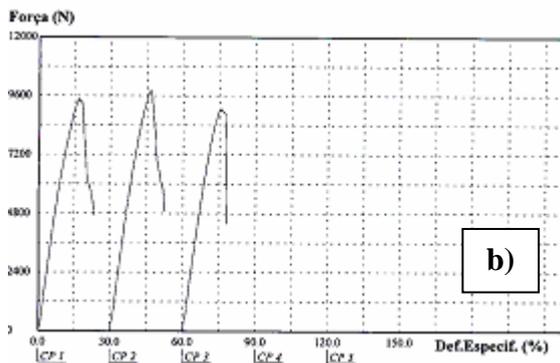
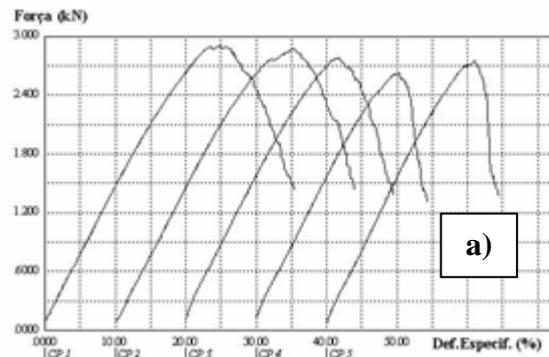
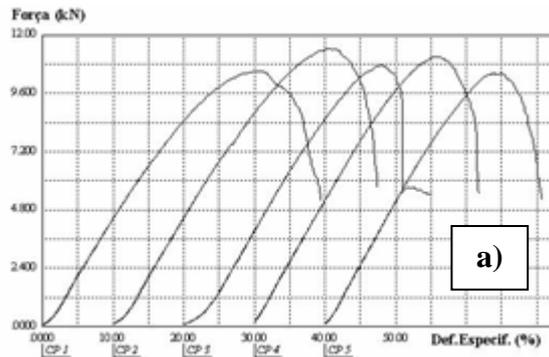


Figura 5. Ensaio de tração realizados no sentido longitudinal de fábrica do geotêxtil tecido: a) amostra virgem, b) amostra submetida ao dano mecânico, c) amostra exposta aos raios UV e d) comparação entre os resultados médios de cada ensaio.

Figura 6. Ensaio de tração realizados no sentido transversal de fábrica do geotêxtil tecido: a) amostra virgem, b) amostra submetida ao dano mecânico, c) amostra exposta aos raios UV e d) comparação entre os resultados médios de cada ensaio.

Esses valores implicam em fatores de redução para instalação, para o geotêxtil tecido, iguais a 1,1 (direção longitudinal) e 1,4 (direção transversal). Entretanto, como geralmente não existe distinção para as direções, o maior valor deverá ser adotado. Esses valores encontrados são exatamente os limites recomendados por Elias et al. (2001), em que o autor recomenda, para geotêxteis tecidos, fatores de redução para a instalação entre 1,1 e 1,4, para solos com o D_{15} do solo próximo de 0,7 mm e tamanho máximo dos grãos igual a 2 mm (solo este muito parecido com o solo utilizado nesta pesquisa).

Entretanto, o autor recomenda a mesma variação de valores para os geotêxteis não tecidos. Como os valores encontrados para os não tecidos foram próximos da unidade, verifica-se que esta recomendação se encontra um pouco conservadora esses geotêxteis.

Koerner (1994) recomenda fatores de redução para fluência quando não se dispõe de isócronas para calcular a tensão característica, iguais a 2,0 para o poliéster e 4,0 para o polipropileno. Com isso, utilizando os valores encontrados nesta pesquisa, os fatores de redução globais para cada tipo de geotêxtil (desprezando fatores de redução quanto à degradação química e biológica, rotineiramente adotados como 1,0 nos procedimentos de cálculo) seriam iguais a 2,0 (2,0 x 1,0) para o geotêxtil não tecido e 5,6 (4,0 x 1,4) para o geotêxtil tecido. Se fosse possível fazer uma distinção entre os fatores de redução para cada sentido utilizado, o geotêxtil tecido apresentaria no sentido longitudinal um fator de redução global igual a 4,4 (4,0 x 1,1).

Esses valores mostram que se for utilizado um método de cálculo utilizando métodos por equilíbrio limite, sem considerar a rigidez dos reforços, seria necessário um geotêxtil tecido com a resistência última à tração 2,8 vezes maior que o geotêxtil não tecido, ou seja, um geotêxtil tecido com resistência à tração última igual a 50 kN/m seria equivalente a um geotêxtil não tecido igual a 18 kN/m.

A deformação na ruptura dos geotêxteis tecidos, fornecidos por ensaios de tração não confinados, apresentam valores muito menores, favoráveis quando o objetivo principal é

reforçar o solo. Entretanto, a rigidez à tração do geotêxtil tecido permanece praticamente constante com o efeito do confinamento, enquanto que o geotêxtil não tecido apresenta incrementos de rigidez à tração consideráveis, quando confinados no solo. Alguns autores como Kamiji (2006) e Gomes (1992) encontraram valores para o módulo confinado dos geossintéticos até cinco vezes maiores do que o módulo obtido por ensaios não confinados.

O bom desempenho de estruturas reforçadas com geotêxtil não tecido é conhecido e muito bem divulgado pelos meios técnicos e acadêmicos, entretanto, este comportamento ainda não consegue ser totalmente explicado, principalmente quando comparados com resultados de comportamentos de estruturas que utilizam reforços menos inextensíveis, como geotêxteis tecidos e geogrelhas. Aliado a fatores secundários, como o controle da drenagem do maciço e sucção do solo, os resultados aqui apresentados podem contribuir para um melhor entendimento dos geotêxteis não tecidos, quando aplicados como elemento de reforço em estruturas de contenção em solo reforçado.

4.2 Degradação aos raios ultravioleta

Com relação aos danos causados pela exposição prolongada aos raios ultravioleta, torna-se difícil uma análise comparativa dos resultados uma vez que o geotêxtil tecido ficou exposto por um período de tempo cinco vezes maior.

No entanto, nota-se que o geotêxtil tecido (PP) apresentou um desempenho semelhante ao geotêxtil não tecido (PET), apesar de ter ficado exposto por um período maior, excetuando-se a direção transversal onde os parâmetros variaram de forma considerável. A literatura técnica tem mostrado que o PP apresenta resistência menor aos raios UV quando comparado ao PET. Segundo Agnelli (2002) o PP puro apresenta resistência baixa à intempérie enquanto que o PET apresenta resistência média. Some-se a isso o fato de que no processo de polimerização do PP é necessária a inclusão de iniciadores para que o Propileno possa reagir com outro Propileno formando assim o Polipropileno. Esses iniciadores são cromóforos

e irão permanecer no polímero final. Esses cromóforos são absorvedores de raios UV, o que torna o PP ainda mais susceptível aos raios UV quando exposto. Em relação ao PET, essa susceptibilidade não ocorre uma vez que a polimerização acontece sem a presença desses iniciadores, pois é uma reação de um ácido com um álcool resultando num éster.

As principais alterações causadas nos polímeros pela radiação UV expressam-se pelo amarelecimento do material, modificações em sua superfície (embaçamento, descoloração, superfície quebradiça e endurecimento superficial) e diminuição das propriedades mecânicas. Esses fatores podem ser verificados pelos resultados apresentados pelos dois geotêxteis.

O geotêxtil não-tecido, fabricado com fibras de PET, apresentou uma redução na resistência última à tração igual a 44% no sentido longitudinal e 38% no sentido transversal, após uma exposição de aproximadamente 200 dias. Com relação ao módulo de rigidez, houve um acréscimo de 60% no sentido longitudinal e 90% no sentido transversal.

Com relação ao geotêxtil tecido de PP, houve uma discrepância elevada comparando-se as duas direções. No sentido longitudinal de fábrica, houve uma redução na resistência última à tração após 1000 dias, aproximadamente, de 33%, enquanto que no sentido transversal, ocorreu uma redução de 84%. Houve um pequeno acréscimo da rigidez à tração do geotêxtil tecido exposto, quando comparado com as amostras virgens. Este acréscimo foi muito parecido com o incremento registrado para o geossintético submetido aos esforços de instalação, apresentando um aumento de aproximadamente 37% no sentido longitudinal de fábrica e 21% no sentido transversal.

5 CONCLUSÕES

Este artigo apresentou a avaliação de amostras de geotêxtil tecido (PP) e não-tecido (PET), submetidas a esforços de instalação e compactação (dano mecânico), e também à exposição à intempérie, principalmente à ação

de raios ultravioletas.

De forma geral, os resultados mostram uma resistência maior ao dano mecânico para o geotêxtil não-tecido (PET) do que para o geotêxtil tecido (PP).

Com relação à degradação UV, apesar da diferença de tempos de exposição, nota-se que o geotêxtil tecido (PP) no sentido longitudinal apresentou uma resistência semelhante ao geotêxtil não-tecido (PET). Entretanto, em seu sentido transversal os danos no geotêxtil tecido foram muito mais acentuados.

Os geotêxteis utilizados nesta pesquisa possuem como função principal o reforço do solo. Entretanto, os dados obtidos podem ser aplicados em situações em que o geossintético necessita ficar exposto por um tempo prolongado, como no topo de taludes de reservatórios, proteção de geomembranas em aterros sanitários, lagoas e canais.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a empresa Ober S.A. e a FAPESP pelo auxílio financeiro que viabilizou a realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Agnelli, J.A.M. (2002). *Técnicas de Caracterização Utilizadas em Materiais Poliméricos* - notas de aula, DEMA/UFSCar, São Carlos, 200 p.
- Azambuja, E. (1994). *Investigação do dano mecânico em geotêxteis não tecidos*. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Elias, V.; Christopher, B.R.; Berg, R.R. (2001). *Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes Design & Construction Guidelines*. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Publication No. FHWA-NHI-00-043, 394p.
- Gomes, R.S. (1992). *Interação solo-reforço e mecanismos de ruptura em solos reforçados com geotêxteis*. 271p. Tese (doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos/USP, São Carlos.
- Kamiji, T.S.M.M. (2006). *Fluência de geotêxteis não tecidos através de ensaios confinados*. 134p. Dissertação (mestrado) - EESC/USP, São Carlos.
- Koerner, R. (1994). *Designing with geosynthetics*. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall, 4ª edição, p.760.
- Rollin, A.L. (2004). Long Term Performance of Geotextiles. Geo Québec 2004, 57th Canadian Geotechnical Conference, Québec, Canadá.