

# ESTUDO SOBRE O EFEITO DA PORO PRESSÃO NO ARRANCAMENTO DE GEOGRELHAS SOB DISTINTAS CONDIÇÕES DE DRENAGEM

A. Koczicki, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, UFPR, Curitiba, Brasil  
S.H.C. Teixeira, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, UFPR, Curitiba, Brasil

## ABSTRACT

This paper presents results of an experimental study on the effects of neutral, positive and negative pressure soil subjected to pullout of geogrids, using a large equipment. For the tests, in addition to the two types of geogrids, with and without drainage device, a thin soil layer at optimum moisture for compression and saturated condition. Various overloads were applied, simulating normal interface pressure. The results expressed a linear relationship between resistance to pullout and the average effective normal stress near the soil-geogrid interface, regardless of the condition of saturation. It also noted that the mobilization of necessary offsets to overcome the resistance to pullout of the inclusions in flooded conditions was well higher than the required for offsets in optimum moisture for compaction.

## RESUMO

O presente trabalho apresenta resultados de um estudo experimental sobre os efeitos das pressões neutras, positivas e negativas, no solo submetido ao arrancamento de geogrelhas, utilizando um equipamento de grande porte. Para os testes, além de dois tipos de geogrelhas, uma com dispositivo de drenagem e outra sem, utilizou-se um solo fino na umidade ótima de compactação e na condição saturada. Foram empregadas sobrecargas variadas, simulando pressão normal de interface. Os resultados expressaram uma relação linear entre a resistência ao arrancamento e a tensão normal efetiva média aplicada próxima à interface solo-geogrelha, independentemente da condição de saturação. Observou-se ainda que a mobilização de deslocamentos necessários para superar a resistência ao arrancamento das inclusões em circunstâncias inundadas foi bem superior à necessária para deslocamentos na umidade ótima de compactação.

## 1. INTRODUÇÃO

Elementos de reforço, tais como geossintéticos e correlatos, exercem efeito importante na integridade estrutural nos maciços de solo. Experimentos destinados a avaliar o comportamento de geogrelhas sob diferentes condições de carregamento contribuem significativamente para o entendimento do comportamento do maciço reforçado.

A poro-pressão, que pode se desenvolver no maciço de solo com inclusões, é um fator que atua negativamente na interação entre solo e reforço e, por conseguinte, pode induzir à desestabilização da estrutura. (Teixeira, 2004)

Ensaio de arrancamento são utilizados com frequência para se avaliar o comportamento desses materiais poliméricos quando submetidos a esforços de tração. A condição de interação solo-geossintético, as propriedades do solo e características do material, são uns dos principais fatores que interferem no desempenho de geogrelhas (Jeweel et al., 1984).

FARRAG et al. (1993) menciona que os processos de preparo e confecção dos ensaios interferem diretamente nos resultados, principalmente com relação a compactação. Além disso, há necessidade de se mensurar deslocamentos e deformações ao longo da inclusão de forma a identificar e analisar os mecanismos de transferências de carga e resistência ao arrancamento (Koerner, 1994).

Outra condição importante é simular um carregamento em superfície, submentendo o solo a tensões variadas e diversificar a situações tanto de carga como de saturação (Teixeira, 2003). Assim, há uma tendência em se padronizar que a aplicação de tal carregamento por meio de bolsões de ar anexados na face superior dos equipamentos, o que proporciona um controle de pressão aplicada (Farrag, et al., 1993).

O trabalho que se apresenta utilizou um equipamento de grande porte da Universidade do Colorado, EUA, o qual estava equipado com sensores LVDT (Linear Variable Differential Transformer), transdutores de poropressão (TTP) e simulação de carregamento a partir de bolsa de ar. Os resultados dos experimentos confrontando dois tipos de geogrelhas em situações de compactação normal e em condições de inundação contribui para o entendimento do desempenho e aplicação de tais materiais em maciços de solo reforçado quando da presença de pressão neutra.

## 2. PROGRAMA DE TESTES

O programa experimental desenvolvido objetivou gerar informações qualitativas e quantitativas a respeito da contribuição que elementos drenantes aderidos aos elementos longitudinais de geogrelhas podem oferecer para a resistência ao arrancamento, sob diferentes condições de saturação.

### 2.1 Materiais Utilizados

As geogrelhas selecionadas para os ensaios foram a Paradrain 100/15 e Paragrid 100/15, com especificações conforme Tabela 1. Os elementos longitudinais do Paradrain possuem formato de canaleta, onde são aderidas fitas de um geotêxtil não tecido de baixa gramatura. Os elementos longitudinais deste produto são capazes de coletar água do solo e permitir o fluxo ao longo do seu comprimento, o que os tornam, portanto, elementos drenantes.

Tabela 1. Propriedades das geogrelhas utilizadas

Propriedades		Paragrid	Paradrain
Resistência à tração (kN/m)	Longitudinal	100	100
	Transversal	15	15
Deformação na ruptura (%)		12	12
Gramatura (g/m <sup>2</sup> )		490	525

Para os testes, além de dois tipos de geogrelhas, uma com dispositivo de drenagem e outra sem, utilizou-se um solo fino classificado pelo Sistema Unificado como CL, com umidade ótima ( $W_{ot}$ ) de compactação a 13%. As componentes de resistência deste solo foram adquiridas através de ensaios triaxiais adensado não drenado saturado com medidas de poropressão, gerando uma coesão ( $c'$ ) de 3 kPa e um ângulo de atrito ( $\phi'$ ) com 30°.

Para exercer o arrancamento das inclusões, utilizou-se um equipamento de grande porte da Universidade do Colorado que consiste em uma caixa metálica, com seção transversal retangular, onde a inclusão fica posicionada entre duas camadas de solo. As sobrecargas são aplicadas na superfície do solo a partir de uma bolsa de ar inflável, colocada entre o solo e a tampa da caixa. A Figura 1 demonstra o equipamento de ensaios.

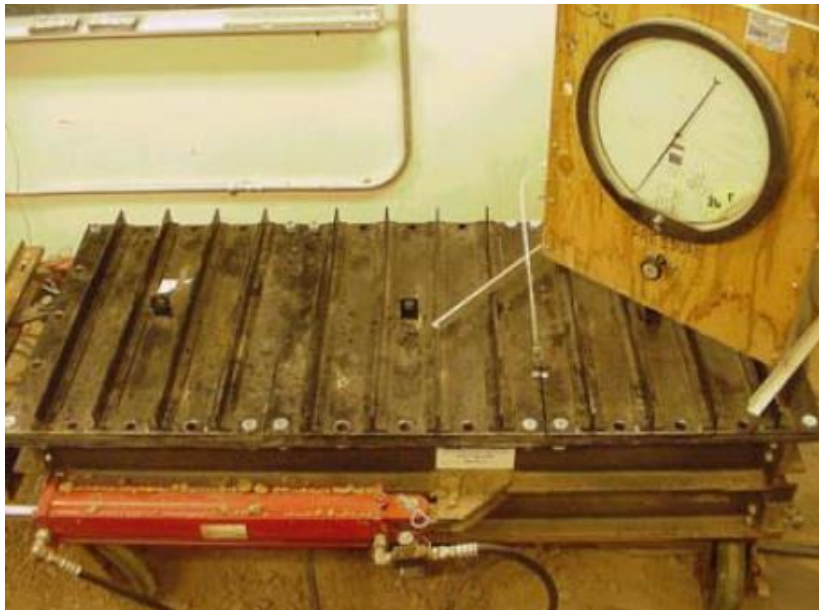


Figura 1. Equipamento para ensaio de arrancamento de grande porte

O sistema de aplicação da força neste equipamento é composto dos cilindros hidráulicos, por uma bomba hidráulica e por uma válvula reguladora de pressão de ar. A bomba tem a função de injetar óleo hidráulico no interior dos cilindros e assim promover a movimentação dos seus êmbolos e gerar os esforços de arrancamento.

O volume de óleo que flui da bomba é tal que o conjunto de cilindros se movimenta a uma velocidade constante de 2 mm/min, podendo ser alterada pelo operador. A instrumentação utilizada neste equipamento é composta por uma célula de carga, quatro LVDTs e dois transdutores de poro–pressão.

A célula de carga é utilizada para medir os esforços de arrancamento originados pela movimentação dos cilindros hidráulicos, os LVDTs são utilizados para acompanhar os deslocamentos da porção enterrada da geogrelha, e os transdutores de poro–pressão para acompanhar as pressões geradas em ensaios com inundação e para medir a sucção

do solo nas condições utilizadas em ensaios sem inundação. A Figura 2 ilustra a instalação dos fios inextensíveis conectados aos LVDT's.

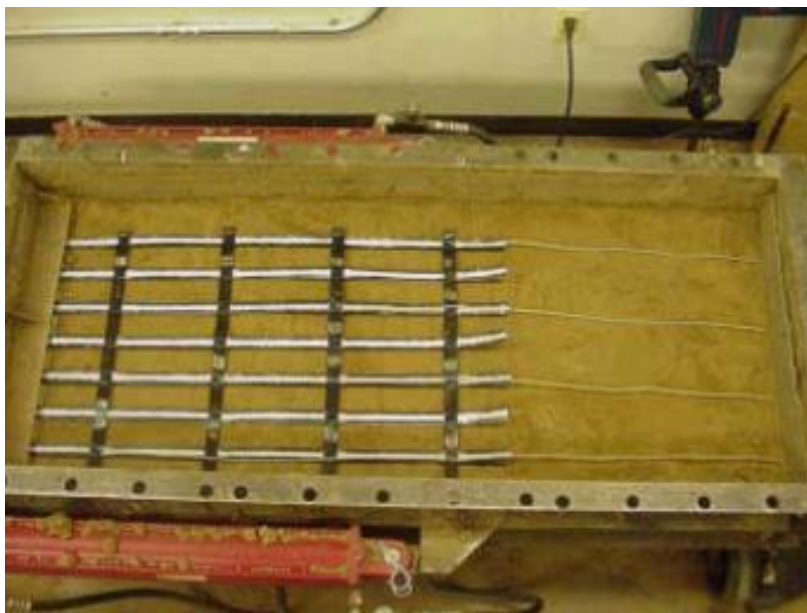


Figura 2. Sistema para medição dos deslocamentos

As leituras dos instrumentos de medição são feitas e registradas por um microcomputador que possui um módulo de aquisição de dados.

## 2.2 Metodologia do Ensaio

Para o estudo estipularam-se duas situações: situação A com solo compactado na umidade ótima e ensaio realizado logo após a compactação e; situação B onde, após compactado, o solo recebe uma carga de água por 48 horas seguidas onde, teoricamente, preencheria todos os vazios tornando o sistema inundado e totalmente saturado.

Assim, executa-se o ensaio na situação B, 48 horas depois da inundação. Foram empregadas sobrecargas de 14, 28 e 49 kPa, simulando pressão normal de interface. A Tabela 2 apresenta a conformação do experimento.

Tabela 2. Programa de testes executados

Teste	Geogrelha	Situação	Carga (kPa)
1	Paragrid 100/15	A	14
2	Paragrid 100/15	A	28
3	Paragrid 100/15	A	49
4	Paragrid 100/15	B	28
5	Paradrain 100/15	A	14
6	Paradrain 100/15	A	28
7	Paradrain 100/15	A	49
8	Paradrain 100/15	B	28

A sobrecarga foi empregue por uma bolsa de ar posicionada na face superior da caixa. Os esforços de tração foram medidos por uma célula de carga e transdutores de poro-pressões foram usados para acompanhar as pressões geradas em situação de inundação e medir a sucção no cenário de solo não saturado.

## 3. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Depois de realizados os ensaios de arrancamento, obtiveram-se os seguintes dados, conforme Tabela 3, onde ressaltam-se os resultados mais expressivos como força máxima de arrancamento  $R_{máx}$ , força de arrancamento referente a 95% da força máxima de arrancamento,  $R_{95\%}$ , e deslocamento frontal  $\delta_{95\%}$ , que se verifica no momento em que  $R_{95\%}$  ocorre.

Tabela 3. Principais dados e resultados dos ensaios de arrancamento

Teste	$R_{m\acute{a}x}$ (kN/m)	$R_{95\%}$ (kN/m)	$\delta_{95\%}$ (mm)
1	31,7	30,1	16,8
2	36,8	35,0	12,1
3	43,4	41,2	12,8
4	12,3	11,7	40,7
5	30,8	29,3	24,6
6	34,4	32,7	16,2
7	43,1	40,9	12,9
8	14,2	13,5	27,4

Para termos comparativos, tomou-se o carregamento de 28 kPa para Situações A e B. Em se tratando dos ensaios, tem-se expresso na Figura 3 os gráficos força versus deslocamento para Situação A.

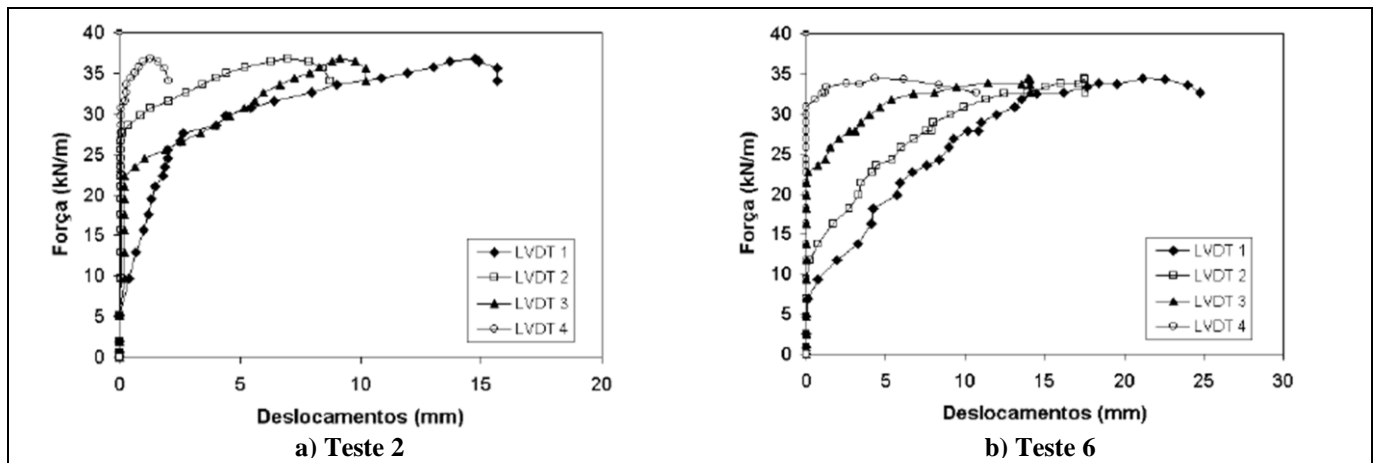


Figura 3. Curvas força vs. deslocamento para testes 2 e 6

As duas geogrelhas apresentam um comportamento bastante similar quando arrancadas. Isto devido a possuem características geométricas e mecânicas praticamente idênticas. Elas diferem entre si basicamente pelas características hidráulicas em função da presença de elementos drenantes no Paradrain, os quais não devem ter efeito quando o solo se encontra na situação A.

Considerando a Situação B, nos testes 4 e 8 foram utilizados dois transdutores de poro–pressão, TPP1 e TPP2, para medir a pressão na fase líquida do solo. A instalação foi no interior do solo a cerca de 10 mm de distância do elemento longitudinal central das amostras de geogrelha. O TPP1 foi instalado acima da inclusão e o TPP2 abaixo. Assim, a Figura 4 apresentam os resultados do teste 4.

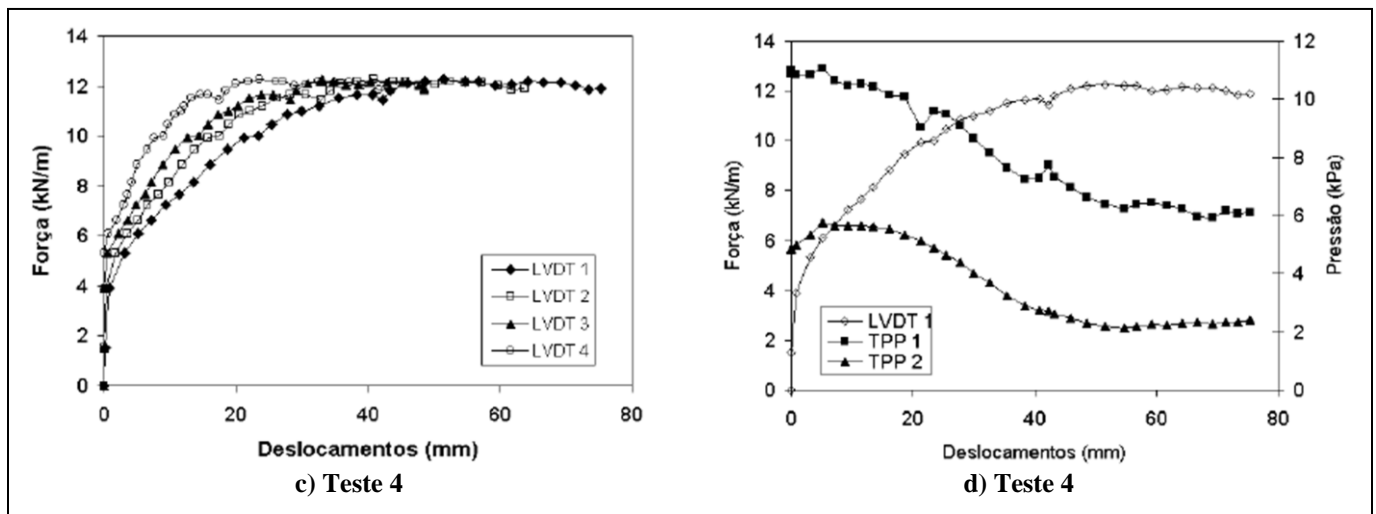


Figura 4. Curvas de força vs. deslocamento (c) e pressão neutra gerada (d) durante o teste 4

A Figura 5 apresenta os resultados no teste 8. Nota-se que os valores de pressão neutra, permanecem próximo a zero, indicando a eficiência dos drenos longitudinais.

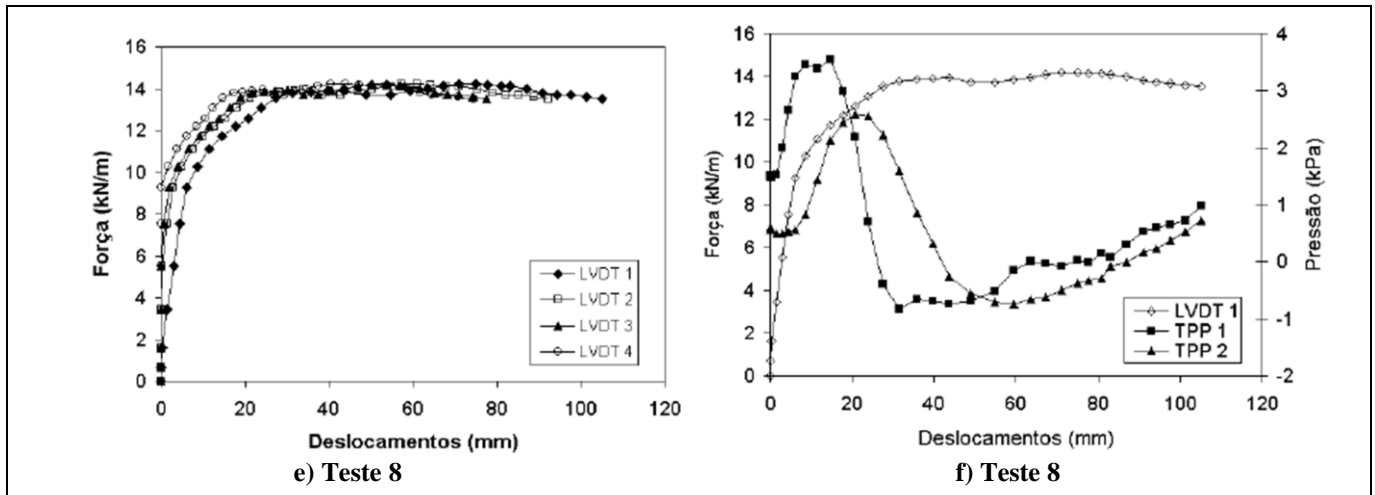


Figura 5. Curvas de força vs. deslocamento (e) e pressão neutra gerada (f) durante o teste 8

Percebe-se das Figuras 6 f) os valores de pressão neutra são significativos no início da etapa de arrancamento dos testes. Isto ocorre pois a aplicação da sobrecarga pela bolsa de ar antes do início do teste gera um adicional de pressão neutra

A partir dos testes executados pode-se efetuar a interpretação dos resultados gerados, apresentados a seguir.

#### 4. INTERPRETAÇÃO E ANÁLISE

São apresentadas análises a respeito do efeito da presença dos drenos e da geração e dissipação de pressões neutras nos resultados de arrancamento.

A Figura 7 apresenta as leituras dos transdutores de poro-pressão n.º 1 e 2, durante a etapa de aplicação da sobrecarga. Das curvas apresentadas, pode-se distinguir três fases distintas: a primeira, na qual a curva é horizontal e indica que a bolsa de ar ainda está em enchimento e não aplica pressão no solo, a segunda, com uma forte inclinação ascendente, que indica que a bolsa em enchimento começa a aplicar pressão na superfície do solo e que esta pressão é parcialmente transmitida para a água nos poros do solo, e a terceira, com uma pequena inclinação descendente, que indica que o solo está se consolidando e expulsando a água sob pressão.

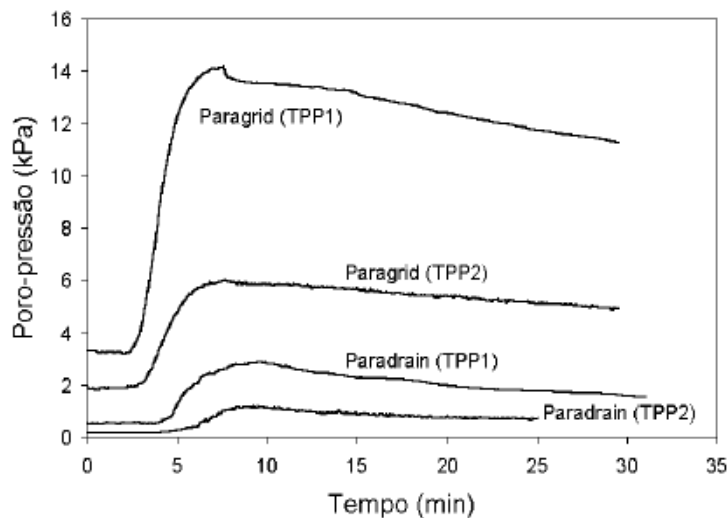


Figura 5. Pressões neutras geradas durante a aplicação da sobrecarga

Apesar de terem sido aplicados 28 kPa na superfície do solo, a pressão neutra gerada sempre foi inferior a este valor. Em ambos ensaios, verifica-se que o TPP1, acima da grelha, registra valores mais elevados de pressão neutra que o TPP2. Isto provavelmente ocorre devido ao elemento longitudinal funcionar como uma barreira ao fluxo de água descendente, não permitindo o umedecimento do solo em torno do TPP2, logo abaixo da inclusão.

Além disso, a compactação do solo logo acima da geogrelha é menor que a do solo logo abaixo, visto que geralmente o grau de compactação de solos não é constante com a profundidade da camada compactada, de forma que é possível que existam diferenças nos parâmetros de consolidação do solo, tais como na tensão de pré-adensamento.

Os parâmetros considerados na análise são a presença de elementos de drenagem nas geogrelhas e o efeito das pressões neutras na resistência ao arrancamento. Estes dois parâmetros são interdependentes e, portanto, são analisados conjuntamente.

A Figura 8 consiste em um resumo dos valores máximos de resistência ao arrancamento dos oito testes realizados. Como foram executados testes com diferentes tensões normais aplicadas para a situação A, é possível se traçar envoltórias de resistência para as duas geogrelhas. Os resultados obtidos pelos testes com solo na situação B permitem apenas a exibição dos pontos individuais de cada teste, visto que somente uma tensão normal foi aplicada.

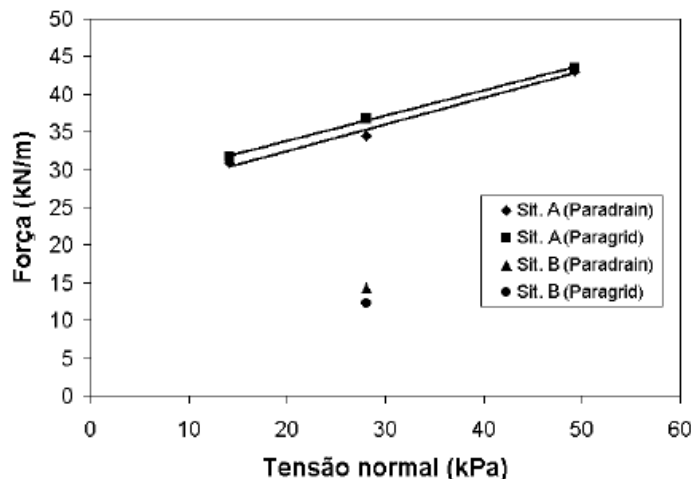


Figura 6. Envoltórias de resistência em termos de tensões totais

Pode-se verificar que as duas envoltórias de resistência ao arrancamento são semelhantes para a situação A, sendo a resistência oferecida pelo Paragrid levemente superior à oferecida na Paradrain. Para a situação B, entretanto, esta tendência se inverte e a resistência obtida pelo Paradrain é um pouco maior que a obtida pelo Paragrid.

Além disso, nota-se que os deslocamentos necessários para se atingir a ruptura por arrancamento nos ensaios com inundação são bastante superiores aos encontrados nos ensaios na situação A. A presença do dreno pode piorar levemente a interação da geogrelha com o solo sob umidade de compactação. Entretanto, quando o solo se encontra sob uma condição de intensa umidade, o dreno pode proporcionar a dissipação das pressões neutras que venham a surgir, aumentando a tensão efetiva do solo próximo à geogrelha e, conseqüentemente, a sua resistência ao arrancamento. Considerando que o valor da sucção no solo permaneceu aproximadamente constante durante todos os testes feitos na situação A, com o valor igual a 65 kPa, e que a tensão efetiva  $\sigma'$  no momento da ruptura é dada por:

$$\sigma' = \sigma - \mu \quad (1)$$

sendo  $\sigma$  a tensão vertical total devido à sobrecarga aplicada e  $u$  a pressão na água do solo no instante da força máxima, podendo ser negativa (sucção) ou positiva, pode-se construir a Figura 9, que relaciona a resistência ao arrancamento com a tensão normal efetiva na interface solo-geogrelha.

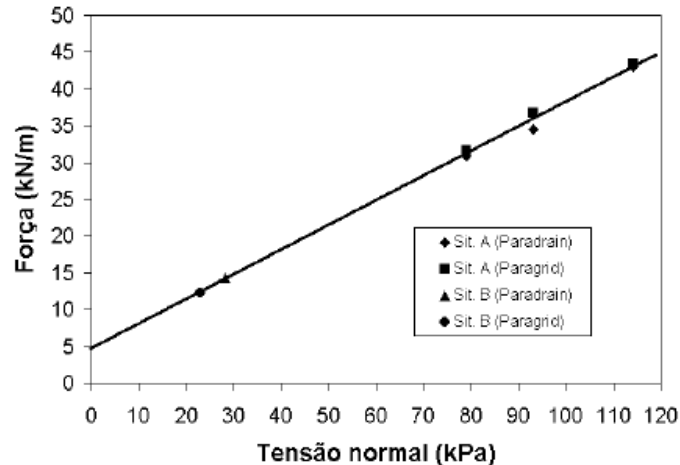


Figura 7. Envoltória de resistência em termos de tensão efetiva

Percebe-se um bom alinhamento entre todos os pontos, independentemente da geogrelha e da situação de umidade do solo, portanto percebe-se que as duas geogrelhas apresentam o mesmo comportamento e que a tensão efetiva no contato entre solo e inclusão governa a resistência ao arrancamento.

## 5. CONCLUSÃO

A partir dos resultados dos ensaios de arrancamento realizados no equipamento de grande porte da Universidade do Colorado e para as condições testadas, é possível obter as seguintes conclusões:

- Existe uma relação linear entre a resistência ao arrancamento e a tensão vertical efetiva média atuante no solo próximo à interface com a geogrelha, independentemente do grau de saturação do solo;
- Os elementos de drenagem aderidos à face da geogrelha influenciam apenas levemente o seu comportamento quando o solo é compactado e está na umidade ótima de compactação durante a aplicação do esforço de arrancamento;
- Quando o solo está sob uma condição de alta umidade, a aplicação de uma sobrecarga pode gerar pressões neutras que diminuem a resistência ao arrancamento de geogrelhas;
- A utilização de elementos de drenagem aderidos aos elementos longitudinais de geogrelhas promove a dissipação de sobrepressões;
- Os deslocamentos necessários para mobilizar resistência ao arrancamento de geogrelhas inseridas em solos previamente sujeitos a inundação é bem superior àqueles quando o solo está na umidade ótima de compactação.

## 6. REFERÊNCIAS

Farrag, K., Acar Y.B. & Juran I. (1993), *Pull-Out Resistance of Geogrid Reinforcements*. Geotextiles and Geomembranes. (12): 3, 133-159.

Jeweel, R. A., Milligan, G. W. E., Sarsby, R. W. & Dubois, D. (1984) *Interaction Between Soil and Geogrids*. Proceeding, Symposium on Polymer Grid Reinforcement in Civil Engineering, Science and Engineering Research Council and Netlon Limited pp. 18-30.

Koerner, R., (1994), *Designing with Geosynthetics*. Ed. Prentice Hall Inc. 783 p.

Teixeira, S.H.C. (2003) Estudo da interação solo-geogrelha em testes de arrancamento e a sua aplicação na análise e dimensionamento de maciços reforçados, Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade da São Paulo, 214 p.