

Influência do dano na resposta de geogrelhas submetidas ao arrancamento

(Influence of damage on the behavior of geogrids submitted to pullout)

Ana Cristina Castro F. Sieira

*D.Sc., Professora Adjunta, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ
E-mail: sieira@uerj.br*

Alberto S. F. J. Sayão

*Ph.D, Professor Associado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC-Rio
E-mail: sayao@puc-rio.br*

Resumo

Em projetos de maciços reforçados com geossintéticos, a resistência à tração de projeto é determinada a partir da aplicação de um fator de redução global sobre a resistência característica do reforço. O fator de redução global é, geralmente, desmembrado em fatores parciais de redução, que consideram a perda de resistência decorrente de danos mecânicos, degradação biológica e deformações por fluência. Em maciços reforçados, o fator de redução por danos mecânicos prepondera sobre os demais, podendo reduzir, significativamente, as propriedades mecânicas do geossintético. O presente trabalho apresenta resultados de ensaios de arrancamento executados com 2 tipos de geogrelhas, previamente danificadas, imersas em solo arenoso, sob diferentes condições de densidade relativa. O dano mecânico foi imposto artificialmente pela ruptura física de elementos da malha. O objetivo desses ensaios consistiu no estudo da influência do dano mecânico no comportamento de geogrelhas. Os resultados indicaram que a influência do dano aumenta com a densidade relativa do solo e sugerem que o dano deve ser investigado a partir de ensaios confinados, considerando-se a interação da geogrelha com o solo envolvente.

Palavras-chave: Dano mecânico, geogrelhas, solo reforçado.

Abstract

In projects of geosynthetically reinforced soil, the design tension values are obtained by considering a global reduction factor on the standard strength value for the reinforcement. This reduction factor is usually subdivided in partial factors, so they may take into account the independent effects of mechanical damage, biological degradation and creep deformations. In reinforced masses, the reduction factor due to mechanical damage is most important and may contribute for a significant reduction of the material's ultimate strength. This paper presents results of pullout tests carried on with mechanically damaged geogrids. Two different geogrids were used in this experimental program. Damage was imposed artificially by physically rupturing a few selected grid elements. The objective of these tests consisted in the influence study of the mechanical damage in the geogrids behavior. The pullout tests were executed under different conditions of relative density. The results indicate that the influence of the damage increases with the relative density of the soil, and suggest that the damage should be investigated from confined tests, taking into consideration the soil-geogrid interaction.

Keywords: Mechanical damage, geogrids, reinforced soil.

1. Introdução

O dano mecânico pode ser definido como a transformação da estrutura do geossintético causada por esforços durante o manuseio e instalação do material e durante a compactação do solo sobrejacente. Paulson (1990) destaca, ainda, uma outra fase do dano mecânico, que ocorre após a compactação e é decorrente das solicitações iniciais de serviço.

O fator de redução devido ao dano mecânico pode ser determinado a partir da razão entre a resistência da amostra de geossintético intacta e a resistência da amostra exumada, imediatamente após os procedimentos de compactação.

Os fatores de redução, têm como objetivo, minorar a resistência-índice dos materiais geossintéticos, definida por ensaios de tração simples e fornecida pelos fabricantes, de forma a incorporar a perda de resistência por dano mecânico.

Em geral, os fatores de redução são definidos a partir de ensaios de tração simples, ou seja, sob condições não confinadas (Wrigley, 1987; Bush, 1988; Elias, 1990; Leclerq et al., 1990; Troost & Ploeg, 1990; Azambuja, 1994). No entanto, em solicitações no campo, os geossintéticos encontram-se quase sempre imersos em uma massa de solo. Dessa forma, os ensaios confinados reproduzem mais adequadamente as condições de operação de geossintéticos em maciços de solo reforçado. A variação das propriedades mecânicas medidas em ensaios confinados proporciona, portanto, uma avaliação mais correta dos fatores de redução devido ao dano mecânico.

Nos sistemas de contenção, o geossintético fica posicionado entre duas camadas de solo com características semelhantes. No caso de materiais angulosos e de granulometria uniforme, o dano mecânico resulta de elevadas tensões nos contatos, decorrentes dos esforços de compactação. As lesões originadas desta forma tendem a apresentar pequenas dimensões.

Lopes (2000) realizou uma série de ensaios de arrancamento em amostras

de geogrelha previamente danificadas, sob diferentes níveis de confinamento. O dano artificial foi induzido através da ruptura de elementos da malha e nove configurações distintas de dano foram ensaiadas. Quando a amostra apresenta danos leves, ocorre a ruptura por arrancamento da geogrelha da massa de solo. No caso de amostras fortemente danificadas, a geogrelha rompe por tração em algum ponto localizado da malha. O autor observou, também, que a razão entre a resistência ao arrancamento da amostra intacta e a resistência ao arrancamento da amostra danificada aumenta com o aumento da tensão confinante.

Resultados de ensaios de tração confinada em geotêxteis não tecidos, embutidos em areia e brita, foram reportados por Azambuja (1999). Quatro níveis de confinamento e três níveis de energia de compactação foram estabelecidos. A energia de compactação foi reproduzida com o auxílio de placas vibratórias, com controle da frequência, amplitude e peso. Como principais conclusões, o autor destaca que, sob um nível baixo de energia de compactação, a resistência confinada é menor do que a resistência não confinada. No entanto, para níveis de energia mais elevados, a resistência confinada é, significativamente, superior.

A grande diferença verificada entre a resistência confinada e não confinada para energias altas de compactação realça a influência do confinamento no desempenho das amostras danificadas.

O presente trabalho apresenta uma série de ensaios de arrancamento em amostras de geogrelhas polimérica e metálica, previamente danificadas. Diferentes configurações e posições de danos foram ensaiadas, com o objetivo de avaliar a perda de resistência em condições confinadas.

Ressalta-se que, nas solicitações de campo, as geogrelhas encontram-se imersas na massa de solo, existindo outras variáveis que afetam a extensão do dano, como a tensão de confinamento, o tipo e a densidade relativa do solo e a contribuição dos elementos transversais.

2. Materiais e métodos

2.1 Características dos materiais

Os ensaios de arrancamento foram executados no Laboratório de Geotecnia do CEDEX (Madri), com dois tipos distintos de geogrelhas, embutidas em solo arenoso.

As geogrelhas utilizadas no programa experimental foram fornecidas pela Maccaferri do Brasil e apresentam as características listadas na Tabela 1.

A Geogrelha 1 (MG) consiste em uma grelha polimérica de malha regular, constituída por tiras tecidas. As tiras são compostas por filamentos de poliéster de alto módulo elástico e baixa susceptibilidade à fluência. Os filamentos de poliéster são revestidos com PVC e têm a função de proteger o núcleo contra danos ocorridos durante os processos de instalação e trabalho.

A Geogrelha 2 (MH) consiste em uma malha hexagonal de aço, constituída por arames de aço de baixo teor de carbono zincado. A grelha é fabricada pelo entrelaçamento dos arames de aço à dupla torção. Uma característica da dupla torção é impedir a propagação de desfiamentos em caso de ruptura acidental de um ou mais fios da malha.

O solo utilizado consiste em uma areia pouco siltosa bem graduada. Os ensaios de caracterização e resistência do solo também foram executados no Laboratório de Geotecnia do CEDEX e consistiram de distribuição granulométrica, densidade real dos grãos e análise mineralógica. A areia apresenta um diâmetro médio de 0,7mm e é constituída, predominantemente, por quartzo e feldspato. A Figura 1 apresenta a curva granulométrica da areia utilizada nos ensaios.

Ensaio de determinação dos índices de vazios máximo e mínimo da areia foram também executados de forma a permitir a obtenção de corpos-de-prova com a densidade relativa especificada para os ensaios (30% e 80%). A areia apresenta índices de vazios máximo e mínimo iguais a 1,37 e 0,58, respectivamente.

Para a obtenção dos parâmetros de resistência, foram executados ensaios de cisalhamento direto em corpos-de-prova de $(1 \times 1) \text{m}^2$, no mesmo equipamento onde foram executados os ensaios de arrancamento com geogrelhas. Dessa forma, procurou-se evitar a introdução de erros causados pelo efeito de escala na interpretação dos resultados. Os ensaios de cisalhamento direto forneceram valores de intercepto coesivo e ângulo de atrito interno iguais a 16kPa e 37° , respectivamente.

2.2 Programa experimental


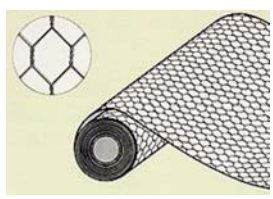
Os ensaios de arrancamento foram executados em amostras de geogrelhas de 1,0m de lado, danificadas mecanicamente. O dano foi produzido através da ruptura física, e artificialmente imposta, de elementos da malha. A Tabela 2 apresenta o programa de ensaios de arrancamento, com a localização dos elementos danificados. Cabe ressaltar que o programa experimental procurou avaliar a influência da densidade relativa do solo e de eventuais danos localizados nos elementos transversais da geogrelha na resistência ao arrancamento de geogrelhas danificadas.

Com a Geogrelha 2 (MH), foram executados ensaios em amostras com 1 ou 3 elementos rompidos, embutidas em areia, sob diferentes densidades relativas (30% e 80%). Os elementos danificados foram distribuídos na direção do arrancamento e na direção perpendicular ao arrancamento. Todos os ensaios foram executados sob um nível de tensão confinante vertical de 25kPa.

No caso da Geogrelha 1 (MG), foram realizados ensaios em areia ($D_r=80\%$), em amostras com danos na tira longitudinal (danos F, G, C, H e I) e na tira transversal central (danos A, B, C, D e E). A localização de danos na tira transversal teve como objetivo avaliar a contribuição dos elementos transversais na resistência ao arrancamento.

O equipamento utilizado consiste em um equipamento de cisalhamento di-

Tabela 1 - Características físicas e mecânicas das geogrelhas.

		Geogrelha 1 - MG	Geogrelha 2 - MH
Físicas	Tipo de polímero	Poliéster com PVC	Aço zincado
	Tipo de malha	Aberturas quadradas	Aberturas Hexagonais
	Processo de fabricação	Tecido	Trançado
	Espessura do elemento (mm)	1,2	2,6
	Aberturas (mm)	20	100 / 80
	Largura dos elementos longitudinais (mm)	8	2,6
	Largura dos elementos transversais (mm)	3	2,6
	Espessura dos elementos transversais (mm)	1,2	2,6
Mecânicas	Resistência à tração longitudinal (kN/m)	97	47
	Resistência à tração transversal (kN/m)	29,4	—
	Alongamento máximo na ruptura	12,8	12
			

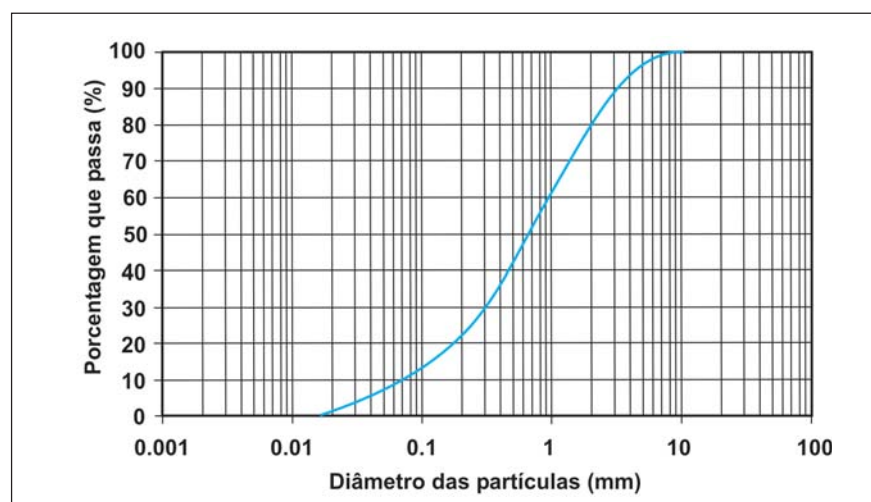
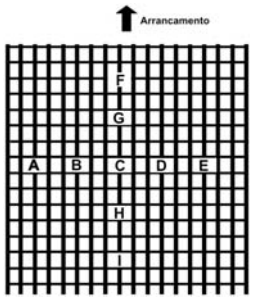
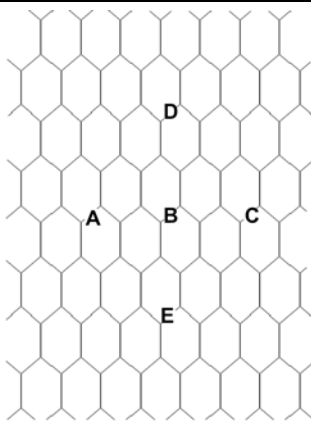


Figura 1 - Curva granulométrica da areia.

Tabela 2 - Programa experimental.

Geogrelha	D _R (%)	Danos	Ensaio	Localização dos danos artificiais
MG	80	Intacta	MG-01	
		B, C, D (**)	MG-02	
		A, B, C, D, E (**)	MG-03	
		G, C, H (*)	MG-04	
		F, G, C, H, I (*)	MG-05	
MH	30	Intacta	MH-01	
		B	MH-02	
		D, B, E	MH-03	
		A, B, C	MH-04	
	80	Intacta	MH-05	
		B	MH-06	
		A, B, C	MH-07	

(*) Danos localizados na tira longitudinal.

(**) Danos localizados na tira transversal.

reto, capaz de ensaiar corpos-de-prova cúbicos com aproximadamente 1,00m de lado.

A caixa de cisalhamento é rígida e constituída por duas metades quadradas de alumínio com dimensões internas de 1,0m de lado x 0,60m de altura, cada uma. O equipamento é composto por dois sistemas de aplicação de carga: um macaco hidráulico vertical e um macaco hidráulico horizontal (Sieira & Sayão, 2002).

Para a execução dos ensaios de arrancamento, uma garra especial é adaptada ao macaco hidráulico horizontal, com o objetivo de produzir o arrancamento da geogrelha. Essa garra foi especialmente projetada para a execução de ensaios de arrancamento em geogrelhas e é capaz de distribuir o esforço de tração uniformemente ao longo da largura da geogrelha (Castro, 1999). A Figura 2 apresenta um esquema do equipamento utilizado para os ensaios de arrancamento.

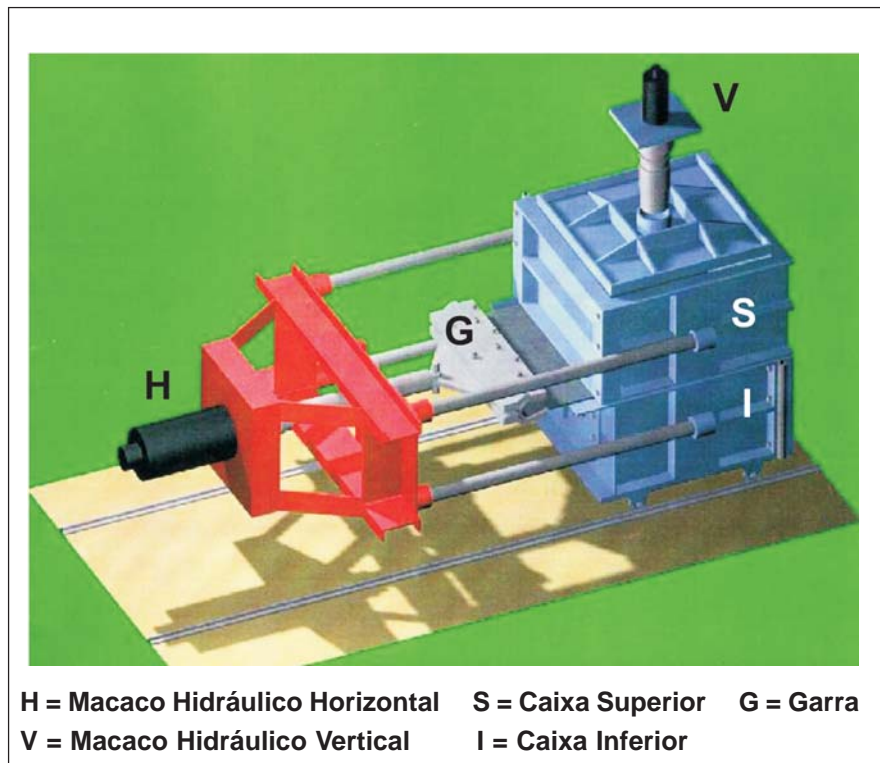


Figura 2 - Esquema do equipamento de arrancamento.

O procedimento de ensaio consistia no preenchimento completo da metade inferior da caixa com solo compactado, posicionamento da geogrelha, fixação da geogrelha na garra de arrancamento e posterior preenchimento da metade superior da caixa. Após a montagem, aplicava-se a tensão confinante e iniciava-se o processo de arrancamento da geogrelha.

Um ensaio preliminar executado com a Geogrelha MG mostrou que a ruptura de apenas um elemento da malha não afeta a resposta dessa geogrelha ao arrancamento, como indica a Figura 3.

3. Resultados

A Tabela 3 apresenta os resultados dos ensaios de arrancamento e os correspondentes fatores de redução devido ao dano mecânico (f_d). Esse fator foi obtido a partir da razão entre a resistência ao arrancamento da amostra intacta e a resistência ao arrancamento da amostra danificada.

Tabela 3 - Fatores de redução por dano mecânico.

Ensaio	P_{ult} (kN/m)	f_d
MG-01	65,1	---
MG-02	49,0	1,32
MG-03	38,2	1,70
MG-04	55,8	1,16
MG-05	41,9	1,55
MH-01	31,1	---
MH-02	29,2	1,06
MH-03	26,0	1,20
MH-04	37,7	0,86
MH-05	44,2	---
MH-06	33,9	1,30
MH-07	32,7	1,35

A resistência ao arrancamento é definida como a razão entre a força máxima obtida durante o ensaio de arrancamento (P_{ult}) e a área confinada da geogrelha na caixa de ensaio ($1m^2$).

Os resultados indicam perdas de resistência significativas com o aumento do número de danos nas amostras de geogrelha.

Na Figura 4, estão apresentados os resultados dos ensaios realizados com a Geogrelha MH em solo arenoso, com densidade relativa de 30%. Nesses ensaios, os elementos danificados foram posicionados na direção do arrancamento. Nota-se uma redução da resistência ao arrancamento com o aumento do número de lesões. No ensaio com três da-

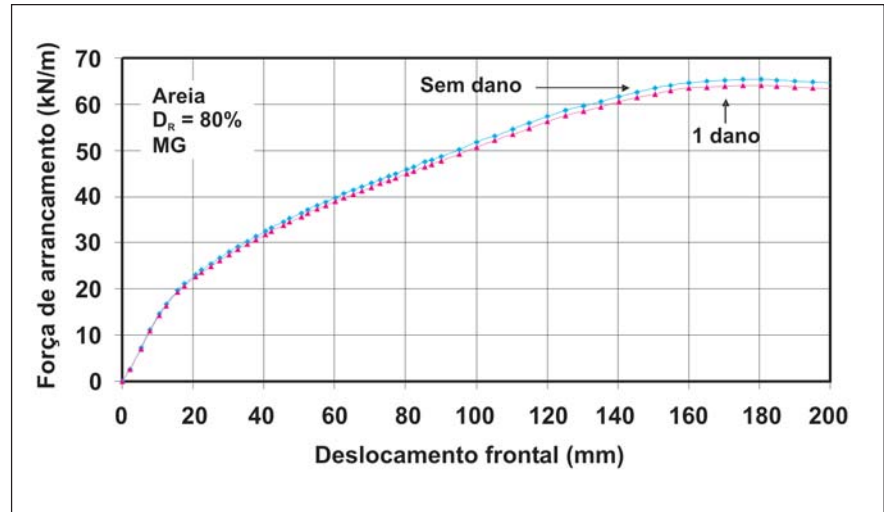


Figura 3 - Ensaios de arrancamento: MG com 1 elemento danificado x MG intacta.

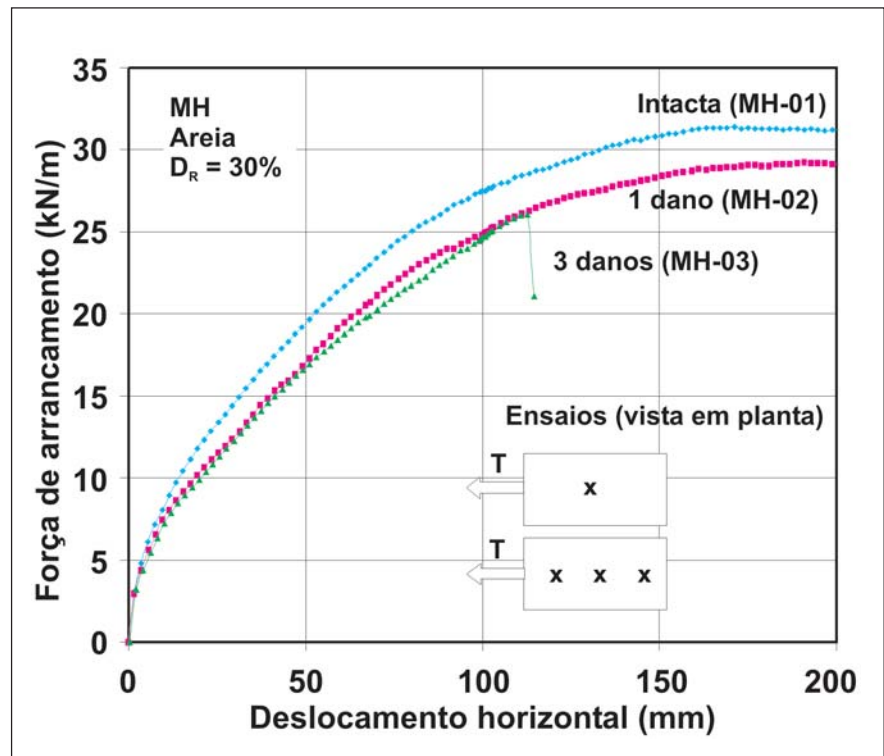


Figura 4 - Ensaios de arrancamento: Geogrelha MH com danos na direção longitudinal ($D_R=30\%$).

nos (MH-03), observou-se a ruptura brusca por tração da malha, quando a carga de arrancamento atingiu 26,0kN/m. Enquanto a malha danificada encontrava-se na região confinada, ela era simplesmente arrancada da massa de solo. No entanto, quando o dano surgiu na região não confinada, a malha rompeu bruscamente por tração. Comportamento semelhante foi reportado por Lopes (2000), que verificou, através de ensaios de arrancamento, que geogrelhas com danos intensos romperam por tração da malha.

O ensaio executado com a Geogrelha MH com 3 elementos danificados na direção transversal ao arrancamento (MH-04) apresentou resistência ao arrancamento superior ao da amostra intacta (MH-01), como mostra a Figura 5. Esse resultado, aparentemente incoerente, pode ser justificado pela ancoragem do elemento danificado na massa de solo, ou seja, como a massa de solo encontrasse em estado fofo, o arame rompido pode ter penetrado no solo, gerando uma resistência adicional durante o arrancamento. A Figura 6 apresenta o detalhe do dano na geogrelha MH ao término dos ensaios. Cabe ressaltar que, apesar de ter apresentado uma resistência ao arrancamento superior, seria inadmissível sugerir que a ocorrência do dano seja favorável. A geogrelha danificada fica mais susceptível a danos ambientais e ataques químicos, comprometendo a sua vida útil.

A Figura 7 apresenta os resultados dos ensaios executados com a Geogrelha MH embutida em areia densa ($D_R=80\%$). Nesses ensaios, as amostras apresentavam danos posicionados na direção longitudinal ao arrancamento e sofreram ruptura por tração da malha. No entanto, esta ruptura ocorreu para diferentes valores de força de arrancamento, decrescendo com o aumento do número de lesões da malha.

Uma comparação entre os resultados dos ensaios com a Geogrelha MH sob diferentes densidades relativas mos-

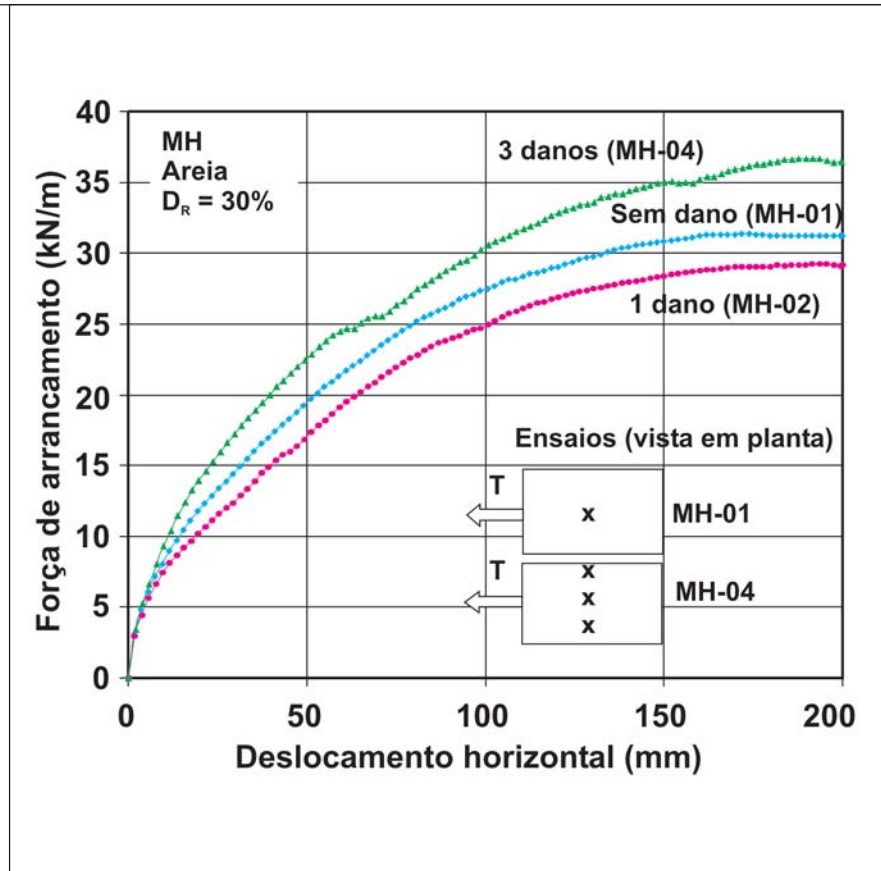


Figura 5 - Ensaios de arrancamento: Geogrelha MH com danos na direção transversal ($D_R=30\%$).

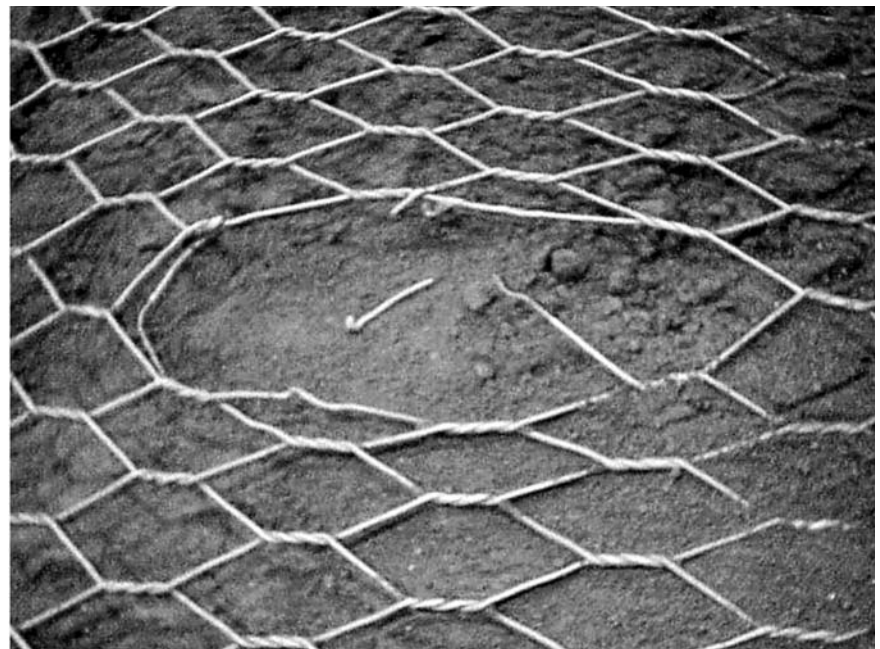


Figura 6 - Detalhe do dano ao término dos ensaios: Geogrelha MH.

tra que, para a mesma configuração de dano (um dano no centro da amostra), o fator de redução é maior para o solo denso ($f_d=1,30$). Em estado fofo ($f_d=1,06$), a malha é arrancada mais facilmente da massa de solo, sendo a influência do dano na resposta ao arrancamento menos significativa. Os resultados sugerem que, quanto maior é a densidade relativa do solo, maior é a influência do dano em solicitações de arrancamento da geogrelha.

A Figura 8 apresenta os resultados dos ensaios executados com a Geogrelha MG, com danos distribuídos ao longo da tira longitudinal central (ensaios MG-04 e MG-05). Pode-se observar que a resistência ao arrancamento diminui, significativamente, com o aumento do número de elementos danificados. Deve-se levar em consideração que, nesses ensaios, a geogrelha é arrancada, deixando o dano exposto. Na região não confinada, observou-se um aumento progressivo da dimensão do dano na direção longitudinal e, em conseqüência, uma redução da rigidez da geogrelha.

Com a Geogrelha MG, foram executados também ensaios com danos posicionados na tira transversal central (Figura 9). Pode-se verificar que houve uma perda significativa de resistência com o aumento de danos na tira transversal. Essa perda de resistência está relacionada à redução da parcela de contribuição do empuxo passivo dos elementos transversais.

Ensaio de arrancamento executados por Sieira (2003) mostraram que a Geogrelha MG apresenta uma elevada parcela de resistência devido à contribuição dos elementos transversais, fato que justifica esse comportamento durante os ensaios de arrancamento com malhas danificadas.

No presente trabalho, foi definido um índice de susceptibilidade S , obtido pela declividade da curva fator de redução (f_d) vs número de elementos danificados. Esse índice fornece o valor médio da redução da resistência ao arrancamento por elemento danificado.

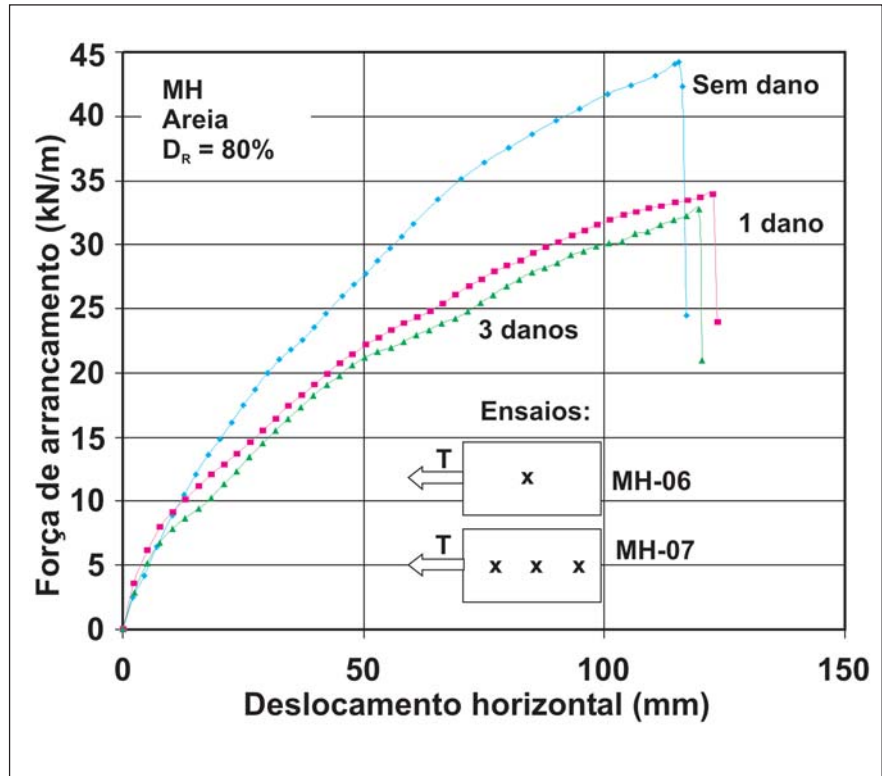


Figura 7 - Ensaio de arrancamento: Geogrelha MH com danos no sentido longitudinal ($D_R=80\%$).

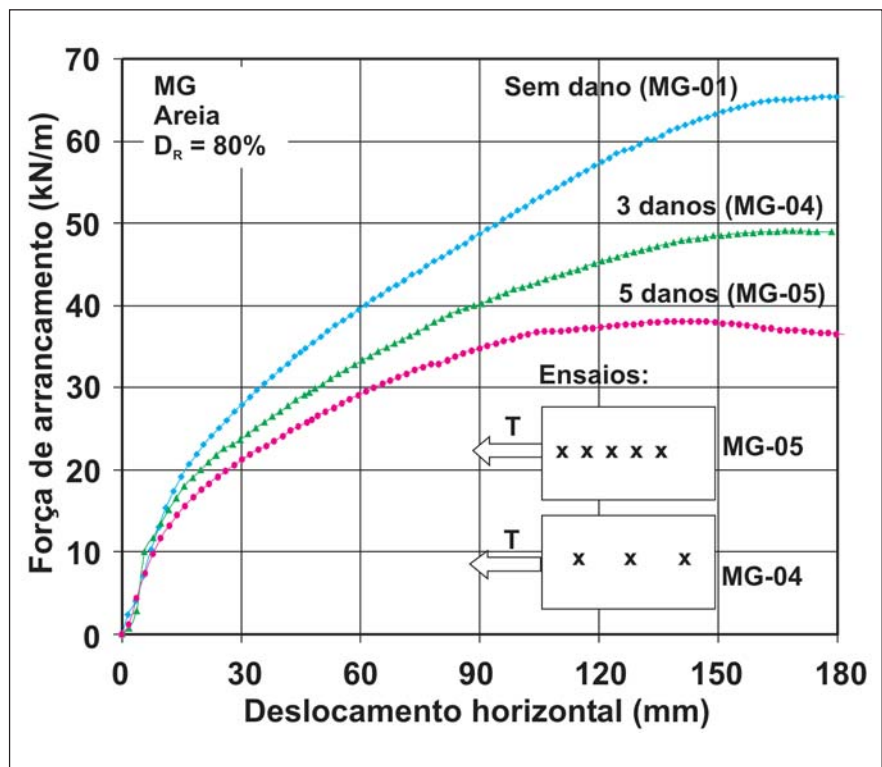


Figura 8 - Ensaio de arrancamento: Geogrelha MG com danos na tira longitudinal central.

O índice S é obtido a partir da expressão:

$$S = \left(\frac{\Delta f_d}{\Delta n} \right) \times 100\% \quad [1]$$

onde: Δf_d é a variação do fator de redução e Δn é a variação do número de elementos danificados.

Quanto maior for o valor de S , mais susceptível é a geogrelha à perda de resistência com o dano induzido. O índice de susceptibilidade indica a influência do dano na resposta ao arrancamento.

A Figura 10 compara o comportamento de ambos os tipos de geogrelha em areia densa, em função do número de elementos danificados artificialmente. É interessante notar que a susceptibilidade de ambas as geogrelhas ao dano foi semelhante. A Geogrelha MH apresentou um índice de susceptibilidade de 8,7%, enquanto a Geogrelha MG apresentou S igual a 8,3%.

Ressalta-se que as geogrelhas ensaiadas apresentavam diferentes características físicas e mecânicas. A influência do dano deve ser avaliada não somente em função das propriedades obtidas a partir de ensaios não confinados. A análise deve considerar, também, o mecanismo de interação da geogrelha com o solo envolvente.

4. Conclusões

Os ensaios apresentados no presente trabalho objetivaram o estudo da influência do dano mecânico no comportamento de geogrelhas sob condição de arrancamento. Dois tipos distintos de geogrelha foram utilizados no programa experimental. Essas geogrelhas foram previamente danificadas e submetidas a ensaios de arrancamento. O dano artificial foi obtido a partir da ruptura física de elementos da malha.

Os ensaios foram realizados sob diferentes condições de densidade relativa da areia e disposição dos danos nas amostras de geogrelha. Um índice de susceptibilidade (S) foi definido para

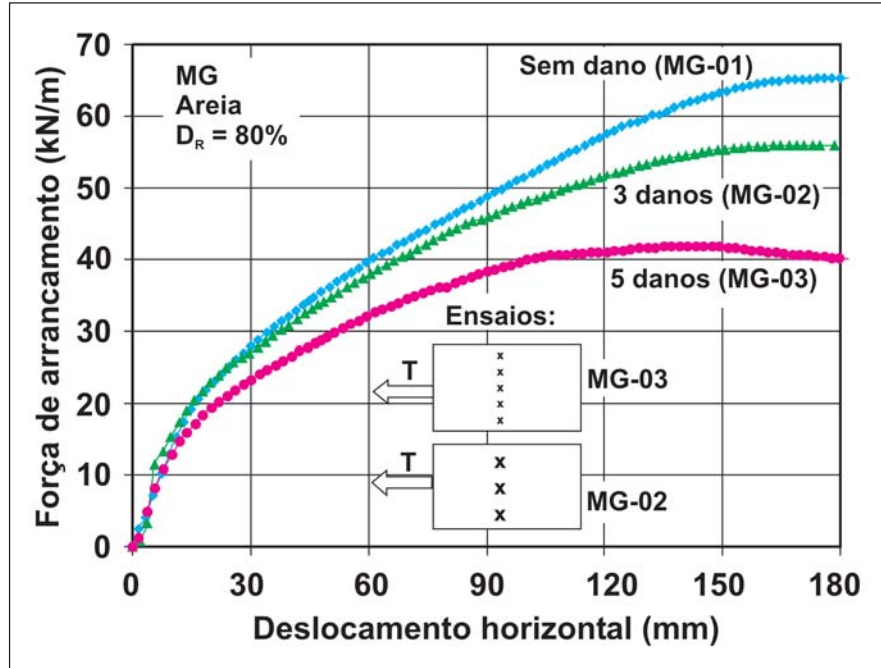


Figura 9 - Ensaios de arrancamento em areia: Geogrelha MG com danos na tiral transversal central.

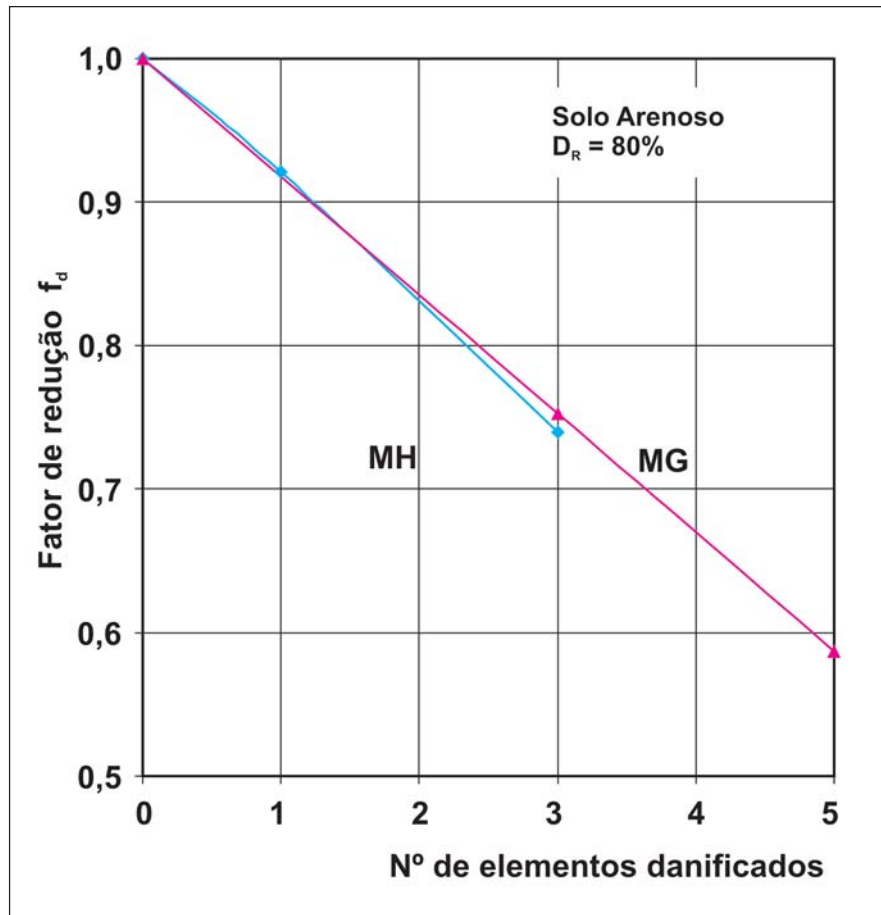


Figura 10 - Susceptibilidade ao dano das diferentes geogrelhas embutidas em areia densa.

permitir a avaliação da influência do dano artificial na resposta ao arrancamento de geogrelhas. Esse índice foi obtido a partir da declividade da curva fator de redução vs número de elementos danificados.

As geogrelhas ensaiadas, apesar de possuírem características físicas e mecânicas distintas, apresentaram índices de susceptibilidade aproximadamente iguais. Esse fato demonstra a necessidade de avaliação do dano sob condições confinadas.

Em solicitações de arrancamento, observa-se que a influência do dano na resposta ao arrancamento aumenta com o número de elementos danificados e com a densidade relativa do solo.

5. Referências bibliográficas

- AZAMBUJA, E. A influência do dano mecânico na tensão admissível dos geossintéticos em estruturas de solo reforçado. SIMPÓSIO SUL-AMERICANO DE GEOSSINTÉTICOS, p. 157-165. 1999.
- AZAMBUJA, E. *Investigação do dano mecânico em geotêxteis não tecidos*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1994. 142p. (Dissertação de Mestrado).
- BUSH, D.I. Evaluation of the effects of construction activities on the physical properties of polymeric soil reinforcing elements. INTERNATIONAL GEOTECHNICAL SYMPOSIUM ON THEORY AND PRACTICE OF EARTH REINFORCEMENT, Fukuoka. Rotterdam: A.A. Balkema, 1988. p. 63-68
- CASTRO, D. C. *Ensaios de arrancamento de geogrelhas no campo e no laboratório*. Rio de Janeiro: Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, 1999. 135p. (Dissertação de Mestrado).
- ELIAS, V. *Durability/corrosion on soil reinforced structures (FHWA/RD)*. Washington: Federal Highway Administration, 1990. p. 89-186.
- LECLERQ, B., SCHAEFFNER, M., DELMAS, P.H., BLIVET, J.C., MATICHARD, Y. Durability of geotextiles: pragmatic approach used in France. INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOTEXTILES, GEOMEMBRANES AND RELATED PRODUCTS. Rotterdam: A.A. Balkema, 1990. v. 2, p. 679-684.
- LOPES, M.L. Study of soil-damaged geogrids interaction behavior. *Solos e Rochas*, v. 23, n. 3, p. 165-176, 2000.
- PAULSON, J. N. Summary and evaluation of construction related damage to geotextiles in reinforcing applications. INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOTEXTILES, GEOMEMBRANES AND RELATED PRODUCTS. Rotterdam: A. A. Balkema, 1990. v. 2, p. 615-619.
- SIEIRA, A.C.C.F. *Estudo experimental dos mecanismos de interação solo-geogrelha*. Rio de Janeiro: Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2003. 363p. (Tese de Doutorado).
- SIEIRA, A.C.C.F., SAYÃO, A.S.F.J. Estudo experimental dos mecanismos de interação solo-geogrelha. In: CONGRESSO NACIONAL DE GEOTECNIA, 8. Lisboa. v. 1. p. 1569-1578, 2002.
- TROOST, G. H., PLOEG, N. A. Influence of weaving structure and coating on the degree of mechanical damage of reinforcing mats and woven geogrids caused by different fills during installation. INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOTEXTILES, GEOMEMBRANES AND RELATED PRODUCTS. Rotterdam: A.A. Balkema, 1990.v. 2, p. 609-614.
- WRIGLEY, N.E. Durability and long-term performance of tensar polymer grids for soil reinforcement. *Materials Science and Technology*, v. 3, p. 161-170, 1987.

Artigo recebido em 11/10/2007 e aprovado em 11/06/2008.

A REM tem novo endereço:

**Rua Carlos Walter Marinho Campos, 57
Bairro: Vila Itacolomy
35400-000 - Ouro Preto - MG**

www.rem.com.br