

MOBILIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO ARRANQUE DE GEOGRELHAS

Mobilization of pullout resistance of geogrids

Ana Cristina C. F. Sieira*

Alberto S. F. J. Sayão**

Denise M. S. Gerscovich***

RESUMO – Neste trabalho, são apresentados e discutidos os resultados de ensaios de arranque, executados em 3 tipos de geogrelhas, os quais apresentam características físicas e mecânicas (rigidez e resistência à tracção) distintas. As geogrelhas foram instrumentadas com medidores de deslocamento horizontal (*tell-tails*) e de deformação (*strain-gages*), instalados em diferentes posições ao longo do seu comprimento. Em todos os ensaios, utilizou-se um solo arenoso. As curvas de carga vs deslocamento mostraram-se sensíveis ao grau de confinamento. A geogrelha bi-orientada apresentou a melhor interação com o solo ensaiado, apesar de não possuir a maior resistência e rigidez à tracção. A distribuição dos esforços de tracção na rotura, ao longo do comprimento da grelha, indica uma influência significativa da metodologia de ensaio e, em particular, do sistema de fixação da geogrelha na garra de arranque.

SYNOPSIS – This paper presents the results of pullout tests carried out on 3 types of geogrids, which show distinct physical and mechanical characteristics (stiffness and strength). The geogrids were instrumented with horizontal displacement gages (*tell-tails*) and strain-gages, placed on different positions along the geogrid's length. In all tests, a sandy soil has been used. The load vs displacement curves revealed a significant influence of the confining level. The bi-directional grid showed the best interaction with the confining soil, despite of not exhibiting the larger value of tensional strength or stiffness. The distribution of tension loads at failure, along the grid length, indicates a significant influence of the test methodology and particularly of the fixing system for the geogrid on the pullout tension grip bar.

PALAVRAS CHAVE – Geogrelhas, Ensaios de Arranque, Mobilização de Tensões e Deformações.

1 – INTRODUÇÃO

A determinação da resistência ao arranque é essencial para o dimensionamento de maciços reforçados. Neste sentido, há um consenso de que o ensaio de arranque é o que melhor representa as situações reais de campo, principalmente quando são utilizadas geogrelhas como elementos de reforço (Amorim Jr., 1992; Palmeira e Milligan, 1989 e Christopher e Berg, 1990).

Em geral, os ensaios de arranque realizados em laboratório utilizam equipamentos de cisalhamento direto modificados através da introdução de uma garra externa. A amostra de reforço, confinada entre 2 camadas de solo, tem sua extremidade conectada à garra e é tracionada sob velocidade constante. O movimento relativo entre o reforço e o solo mobiliza tensões de cisalhamento

* D.Sc. Professora Visitante, UERJ. e-mail: sieira@uerj.br

** Ph.D Professor Associado, PUC-Rio. e-mail: sayao@civ.puc-rio.br

*** D.Sc. Professora Adjunta, UERJ. e-mail: deniseg@uerj.br

nas duas faces do reforço, que se opõem ao movimento. Nas análises usuais pressupõe-se que as tensões de cisalhamento na interface solo-reforço sejam uniformemente distribuídas durante a solitação. Assim, a tensão cisalhante na interface pode ser calculada por:

$$\tau_{SG} = \frac{P}{2.B.L} \quad (1)$$

onde: P = força de arranque;
B = largura da geogrelha;
L = comprimento de ancoragem da geogrelha.

Admite-se, ainda, que satisfaçam ao critério de rotura de Mohr-Coulomb (Koerner, 1998), ou seja:

$$(\tau_{SG})_f = c'_a + \sigma' \cdot \tan \delta' \quad (2)$$

onde: $(\tau_{SG})_f$ = tensão cisalhante na interface solo-reforço na rotura;
 δ' = ângulo de atrito na interface solo-reforço;
 c'_a = adesão na interface solo-reforço;
 σ' = tensão normal efetiva.

Ressalta-se, entretanto, que a geogrelha, quando submetida ao arranque, sofre deformações não uniformes ao longo do comprimento. A tração na geogrelha concentra-se na extremidade tracionada e vai diminuindo gradativamente até a extremidade livre. Conseqüentemente, um processo de deformação progressiva é mobilizado ao longo da geogrelha (Saez, 1997; Juran e Chen, 1988).

Métodos de interpretação da resistência ao arranque foram propostos na literatura, considerando a distribuição não uniforme de tensões durante o ensaio (Ochiai et al, 1996; Teixeira, 1999).

Ochiai et al (1996) propõem uma metodologia de avaliação da resistência ao arranque, com base nos deslocamentos internos medidos em diferentes pontos ao longo do reforço. A partir das medidas de deslocamentos, obtêm-se as deformações em diferentes pontos da inclusão.

Teixeira (1999) utiliza funções de deslocamento (δ) ajustadas aos pontos experimentais. A função deformação (ϵ) é então, obtida, a partir da derivada da função deslocamento (δ).

A distribuição das deformações, e conseqüentemente, das tensões, ao longo do comprimento da geogrelha é não-linear. Cabe ressaltar, portanto, a importância do monitoramento dos deslocamentos ao longo do comprimento da geogrelha, para permitir uma melhor compreensão dos mecanismos de transferência de carga.

No presente trabalho, foi adotada uma metodologia para análise da distribuição das deformações ao longo do comprimento da geogrelha similar à proposta por Ochiai et al (1996). Esta análise requer o conhecimento dos deslocamentos internos da geogrelha durante a solitação de arranque.

Os ensaios de arranque foram instrumentados com medidores de deslocamentos (*tell-tails*), instalados em distintos pontos ao longo do comprimento da geogrelha. Em alguns ensaios, dispunha-se também dos resultados de medidores de deformação (*strain-gages*), permitindo uma combinação entre as deformações estimadas a partir das leituras dos *tell-tails* e as deformações medidas diretamente pelos *strain-gages* (Sieira et al., 2002).

2 – PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental constou de 9 ensaios de arranque, instrumentados, executados com 3 tipos de geogrelhas embutidas em solo arenoso, como apresentado na Tabela 1.

A instrumentação consistiu de *tell-tails* e *strain-gages*, instalados em diferentes posições ao longo da geogrelha. Nos ensaios com a Malha Metálica, não foram utilizados *strain-gages*, devido à dificuldade de aderência destes instrumentos à malha, que apresenta elementos com seção circular de pequena espessura (2,6mm).

O objetivo destes ensaios consistiu em avaliar a resistência ao arranque dos diferentes tipos de geogrelhas e a influência da tensão confinante no processo de mobilização das tensões e deformações ao longo da geogrelha. As tensões de confinamento variaram de 5kPa a 50kPa, correspondendo a embutimentos no campo de até cerca de 2,5m.

Tabela 1 – Programa de Ensaios de Arranque.

Tipo de Geogrelha	Tensão Confinante (kPa)	Instrumentação
MacGrid	5; 12,5 e 25	<i>Tell-tails / Strain-gages</i>
ParaGrid	5; 12,5 ; 25 e 50	<i>Tell-tails / Strain-gages</i>
Malha Metálica	5; 12,5 e 25	<i>Tell-tails</i>

2.1 – Características das Geogrelhas

As geogrelhas utilizadas no programa experimental foram fornecidas pela empresa Maccaferri do Brasil (Figura 1). Foram ensaiadas as geogrelhas de malha regular (MacGrid 11/3-W e ParaGrid 200/15) e a Malha Metálica Hexagonal.

A MacGrid 11/3-W é uma geogrelha constituída por tiras tecidas, compostas por filamentos de poliéster de alto módulo elástico e baixa susceptibilidade à fluência (“*creep*”). Os filamentos de poliéster são revestidos com PVC, que têm a função de proteger o núcleo contra danos ocorridos durante os processos de instalação e trabalho.

A ParaGrid 200/15 é constituída por tiras soldadas, compostas por filamentos de poliéster revestidos em polietileno.

A Malha Metálica Hexagonal é constituída por arames de aço de baixo teor de carbono zinca-do. A grelha é fabricada pelo entrelaçamento dos arames de aço à dupla torção.

As principais características físicas e mecânicas das geogrelhas, fornecidas pelos fabricantes, estão listadas na Tabela 2. Os resultados indicam que a grelha ParaGrid apresenta maior resistência à tracção longitudinal (200 kN/m), equivalente a aproximadamente o dobro da resistência da MacGrid e 4 vezes superior à da Malha Metálica. Em termos de alongamento máximo na rotura (da ordem de 12%) não há diferença significativa entre as geogrelhas.

Ensaio de tracção simples, realizados na presente campanha experimental mostraram resultados diferentes dos sugeridos pelo fabricante (Figura 2). As curvas pontilhadas representam os resultados fornecidos pelo fabricante. Os ensaios das geogrelhas poliméricas (MacGrid e ParaGrid)

foram conduzidos de acordo com a norma NBR 12824 (1993), que especifica os procedimentos para determinação da resistência à tracção não confinada, através de ensaios de tracção de faixa larga.

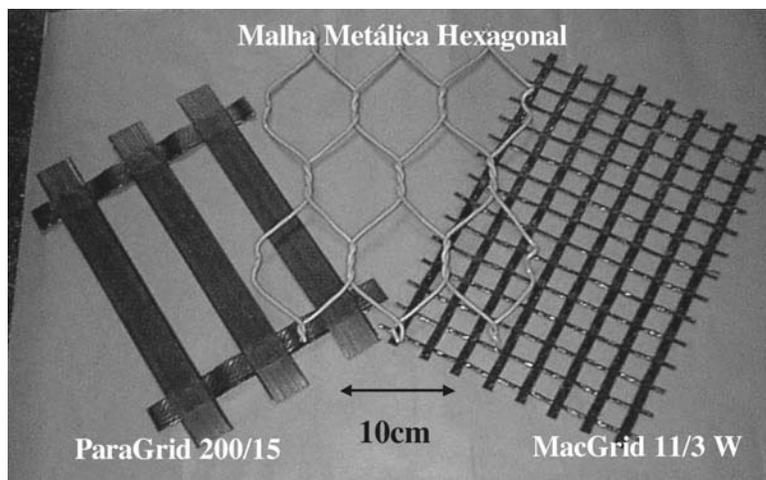


Fig. 1 – Geogrelhas ensaiadas no programa experimental.

Tabela 2 – Características Físicas e Mecânicas das Geogrelhas (Macafferri do Brasil).

		MacGrid 11/3-W	ParaGrid 200/15	Malha Metálica
FÍSICAS	Tipo de polímero	Poliéster com PVC	Poliéster c/ Polietileno	Aço zincado
	Tipo de malha	Abertura quadrada	Abertura retangular	Abertura Hexagonal
	Processo de fabricação	Tecido	Termo-soldado	Trançado
	Espessura do elemento (mm)	1,2	1,6	2,6
	Aberturas (mm)	20,0	225 / 75	100 / 80
	Largura dos elementos longitudinais (mm)	8,0	33	2,6
	Largura dos elementos transversais (mm)	3,0	24	2,6
MECÂNICAS	Resistência à tracção longitudinal (kN/m)	97,0	200	47
	Resistência à tracção transversal (kN/m)	29,4	15	–
	Alongamento na rotura (%)	12,8	12	12

A Figura 3a mostra o equipamento utilizado, onde foram ensaiadas amostras de 20cm de largura e 10cm de distância entre as garras. No caso da Malha Metálica, foi utilizado um equipamento especialmente projetado para ensaios de tracção neste tipo de geogrelha (Castro, 1999). Neste equipamento, foram ensaiadas amostras de 90cm de largura, correspondendo a nove unidades hexagonais (Figura 3b).

Apesar dos ensaios terem seguido os procedimentos preconizados pela norma NBR 12824, os resultados observados com a geogrelha ParaGrid foram significativamente diferentes dos dados do fabricante, tanto em termos de deformabilidade quanto de carga na rotura; já a geogrelha MacGrid

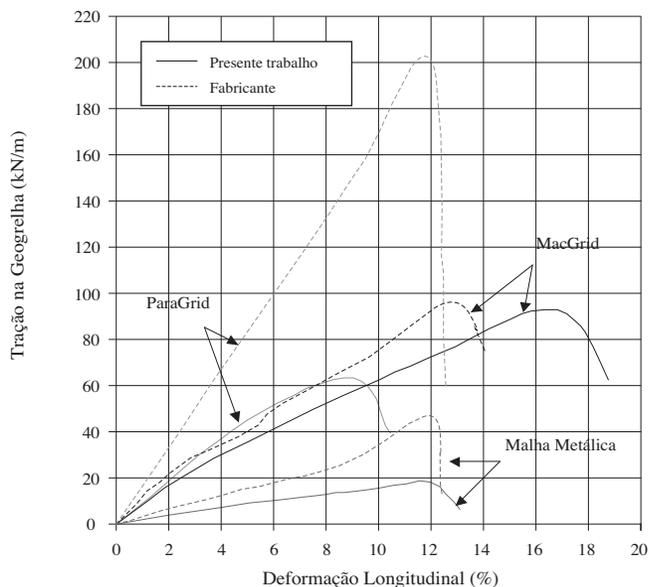


Fig. 2 – Ensaio de tracção simples.

mostrou-se mais flexível, apesar da resistência ser da mesma ordem de grandeza da sugerida pelo fabricante. As curvas de tracção da Malha Metálica foram razoavelmente semelhantes para deformações longitudinais inferiores a 8%; próximo à condição de rotura, a curva do fabricante mostra um incremento de resistência o qual pode ser atribuído à deformação da unidade hexagonal. As diferenças entre resultados obtidos e os fornecidos pelo fabricante podem ser atribuídas a diferenças no sistema de fixação da amostra. No caso da geogrelha ParaGrid, observou-se o deslizamento relativo entre a garra e a amostra, durante o ensaio de tracção. Este fato provocou maiores registros de deformação e resultou em menor valor de resistência. Em relação à Malha Metálica, o sistema de fixação induzia a rotura de arames isolados da malha, não representando satisfatoriamente a resistência do conjunto.



a) Geogrelhas poliméricas



b) Malha Metálica

Fig. 3 – Equipamentos de tracção simples.

2.2 – Características do Solo

O solo utilizado foi uma areia, constituída predominantemente por quartzo e feldspato. Na Tabela 3, estão apresentadas as principais características geotécnicas, incluindo os parâmetros de resistência. Estes parâmetros foram obtidos em ensaios de cisalhamento direto, no mesmo equipamento onde foram executados os ensaios de arranque. Com isso, procurou-se evitar erros causados pelo efeito de escala na interpretação dos ensaios com solo-geogrelha.

Os corpos de prova foram preparados com uma densidade relativa de 80% e um teor de umidade de $10,0 \pm 0,2\%$. O valor de peso específico seco mínimo de $11,4 \text{ kN/m}^3$ resulta em um valor de e_{max} de 1,33, considerado relativamente elevado para areias. Entretanto, outros autores (Díaz, 2000) obtiveram resultados similares em ensaios executados no mesmo material e segundo os mesmos procedimentos de compactação.

2.3 – Descrição dos Ensaios

Para a execução dos ensaios, utilizou-se um equipamento de cisalhamento direto, acrescido de uma garra especial, acoplada a um sistema de aplicação de carga (Castro, 1999).

A caixa de cisalhamento, bipartida, era de alumínio, com seção quadrada, de dimensões internas de 1,0m de lado e 0,60m de altura (Figura 4a). Durante os ensaios, o espaçamento vertical entre as metades da caixa era mantido constante e igual a 50mm.

Tabela 3 – Características geotécnicas do solo arenoso.

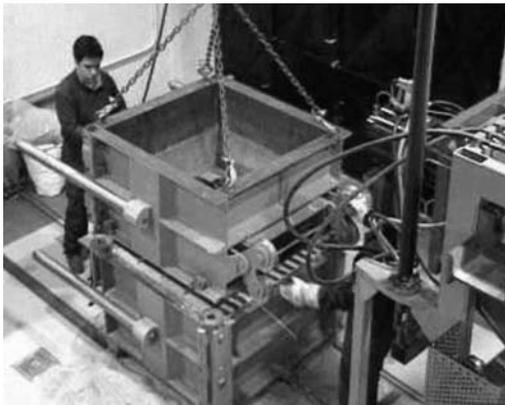
Parâmetro	Valor
Densidade dos grãos - G_s	2,71
Diâmetro correspondente a 50% da porcentagem do solo em peso - D_{50} (mm)	0,75
Teor de umidade natural - ω_{nat} (%)	$10,0 \pm 0,2$
Peso específico aparente seco máximo - γ_{dmax} (kN/m^3)	17,1
Peso específico aparente seco mínimo - γ_{dmin} (kN/m^3)	11,4
Densidade relativa - D_r (%)	80
Coesão efetiva - c' (kPa)	16,0
Ângulo de atrito efetivo - ϕ' (°)	37

A metade inferior da caixa de cisalhamento era preenchida compactando-se o solo em 2 camadas de 17,5cm de altura (Figura 4b). Em seguida, a amostra de geogrelha, com 0,90m de largura e 1,80m de comprimento, era posicionada (Figura 4c). Na extremidade frontal, a geogrelha era abraçada pela garra (Figura 4d), de tal forma que um maior esforço de tracção provocava uma melhor fixação da geogrelha. Adicionalmente, garantia-se uma distribuição uniforme da força de tracção em toda a largura da amostra. Após a adaptação da geogrelha na garra, o comprimento enterrado da geogrelha era de 1,00m. O posicionamento da metade superior da caixa era feito com o auxílio de um guindaste, fixado a um sistema de pontes rolantes. O preenchimento e a compactação do solo nesta região eram feitos de forma análoga à descrita para a caixa inferior. Durante os ensaios, a força de arranque era aplicada por um macaco hidráulico horizontal, com capacidade de até 0,3 MN. Um servo-controle horizontal garantia uma velocidade de arranque constante.

No caso da força vertical, um macaco hidráulico, acoplado a um mecanismo de servo-controle, garantia a aplicação de uma tensão de confinamento constante durante todo o ensaio.

Transdutores de deslocamento com precisão de 0,1mm registravam os deslocamentos verticais da amostra e os deslocamentos frontais da geogrelha. As leituras nas células de carga e transdutores eram transferidas diretamente para o computador a cada 15 segundos.

Os ensaios foram instrumentados com 4 medidores de deslocamento interno (*tell-tails*) e 4 medidores de deformação (*strain-gages*), posicionados ao longo da geogrelha. Os *tell-tails* eram compostos por fios inextensíveis, protegidos por tubos de vinil, para evitar perturbações ou atrito com o solo confinante. As extremidades dos fios eram conectadas a transdutores de deslocamento (LVDTs), com precisão de 0,1mm. Estes transdutores eram acoplados a uma banqueta fixa, na parte posterior do equipamento. A Figura 5 mostra a posição da instrumentação ao longo da grelha.



a) Vista do equipamento



b) Preenchimento da caixa de ensaio



c) Posicionamento da geogrelha



d) Detalhe da garra de arranque

Fig. 4 – Montagem e Execução do Ensaio de Arranque.

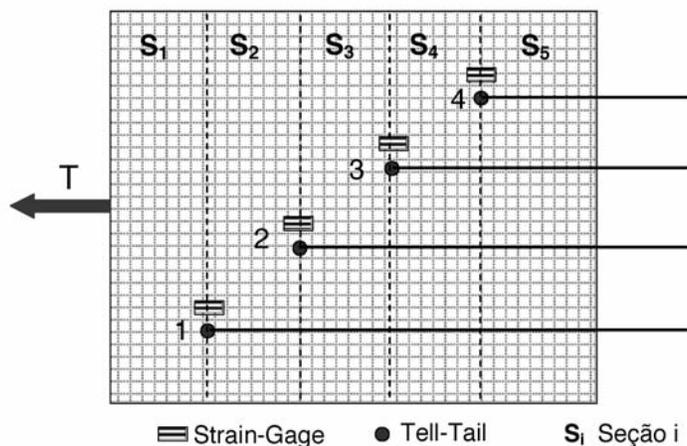


Fig. 5 – Seções da geogrelha e posição da instrumentação.

A Figura 6 apresenta a geogrelha MacGrid totalmente instrumentada. Maiores detalhes sobre o equipamento e a instrumentação podem ser obtidos em Seira (2003).

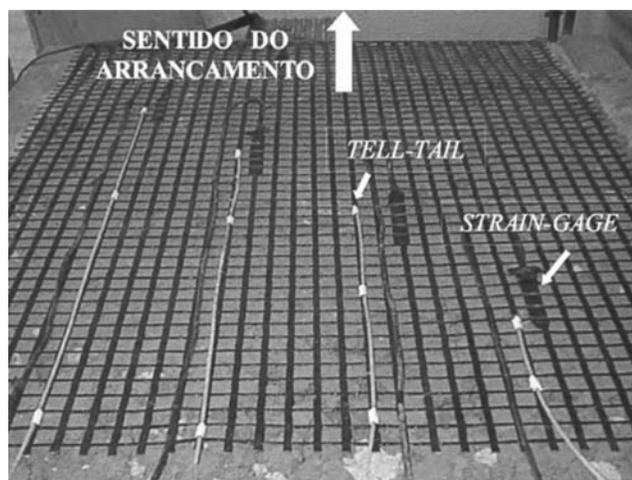


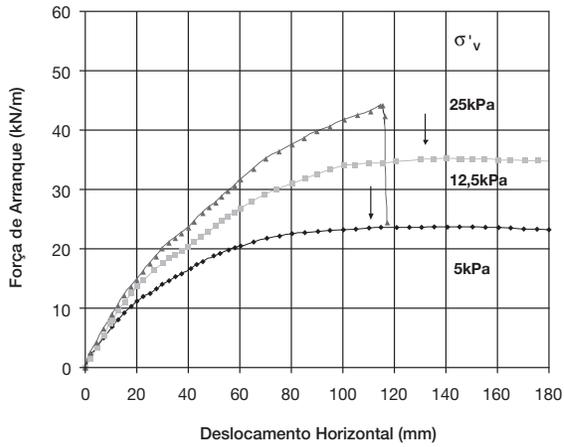
Fig. 6 – Geogrelha instrumentada.

3 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

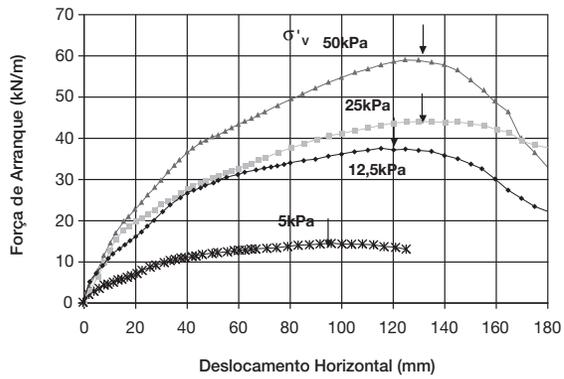
3.1 – Mobilização da Resistência

A Figura 7 mostra as curvas de força de arranque vs deslocamento horizontal para as 3 geogrelhas ensaiadas, sob diferentes condições de confinamento. Os valores relativos à condição de rotura estão apresentados na Tabela 4.

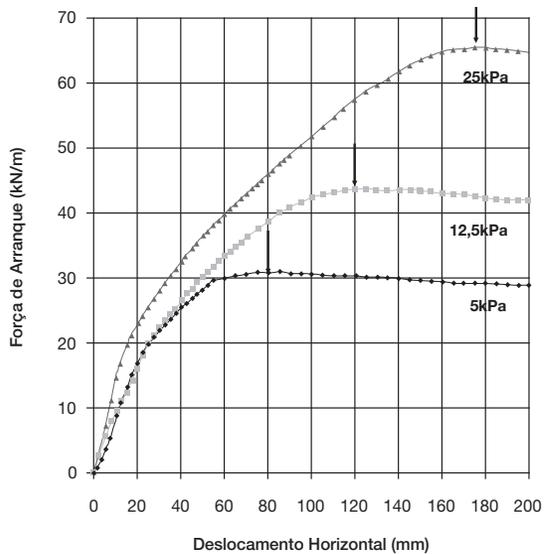
Nos ensaios com a Malha Metálica, houve uma rotura no contato com a garra, para tensão confinante de 25kPa. Nesta região, não confinada, observou-se uma distorção dos hexágonos da malha, resultando em grandes deformações. Neste ensaio, a geogrelha sofreu arranque, em conjun-



(a) Malha Metálica



(b) ParaGrid 200/15



(c) MacGrid 11/3-W

Fig. 7 – Força de arranque vs deslocamento horizontal.

to com um processo de tracção na região não confinada. Processo de arranque foi confirmado a partir de medidas de deslocamentos internos. A Figura 8 mostra que o ponto mais próximo à extremidade de aplicação da carga atingiu deslocamentos da ordem de 45mm, antes da rotura da malha por tracção. Os pontos mais internos registraram deslocamentos de menor magnitude, mas também foram mobilizados por arranque. Detalhes sobre o posicionamento desses medidores estão mostrados na Figura 5. O limite da força registrada foi da ordem de 47kPa, apresentando a mesma ordem de grandeza do valor fornecido pelo fabricante para o ensaio de tracção simples. Mais uma vez, fica evidente a influência do sistema de fixação da amostra, tendo em vista que face à presença de 2 mecanismos agindo simultaneamente (arranque e tracção), seria esperado que o valor de carga na rotura fosse superior à resistência à tracção fornecida pelo fabricante.

Tabela 4 – Força e deslocamento na rotura.

Tensão confinante (kPa)	5	12,5	25	50
Tipo de Geogrelha	Deslocamento (mm)			
MacGrid 11/3-W	80,0	120,0	176,0	–
ParaGrid 200/15	92,0	120,0	125,7	130,0
Malha Metálica	115,0	130,3	170,0	–
Tipo de Geogrelha	Força (kN/m)			
MacGrid 11/3-W	30,8	43,5	65,1	–
ParaGrid 200/15	15,0	37,1	44,1	59,0
Malha Metálica	23,6	35,2	–	–

A geogrelha ParaGrid apresentou os menores deslocamentos na rotura e foi a única que mostrou perda considerável de resistência, após atingida a força máxima de arranque. Durante o processo de arranque, os elementos transversais se desprenderam dos longitudinais, o que poderia, de certa forma, ter interferido nos resultados. Por outro lado, este tipo de geogrelha apresentou os menores esforços de arranque na rotura.

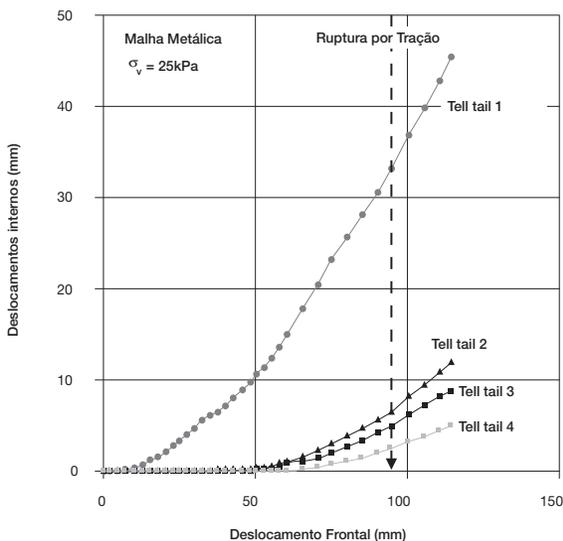


Fig. 8 – Deslocamentos internos da malha metálica.

Nos ensaios com a geogrelha MacGrid, observou-se as maiores cargas de arranque na rotura e deslocamentos relativamente elevados, compatíveis com os da Malha Metálica.

Considerando-se a interação solo-reforço, atuante em ambas as faces da geogrelha, foram definidas as envoltórias de resistência (Equação 2) das 3 geogrelhas e calculados os parâmetros de resistência na interface: adesão (c'_a) e ângulo de atrito (δ'). Nos resultados apresentados na Figura 9, observa-se que a geogrelha ParaGrid, apesar de possuir resistência à tracção longitudinal superior às demais, apresentou a menor interação com o solo ensaiado. Independente do nível de confinamento, a geogrelha MacGrid mobilizou a maior interação na interface.

A Figura 9 apresenta, também, a envoltória de resistência do solo arenoso. Os parâmetros de resistência na interface podem ser expressos em função dos parâmetros de resistência do solo em contato (c' e ϕ'), através dos coeficientes de interação (λ e f), definidos como:

$$\lambda = \frac{c'_a}{c'} \quad (3)$$

$$f = \frac{\tan \delta'}{\tan \phi'} \quad (4)$$

Deste modo, a equação (2) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$(\tau_{SG})_F = \lambda \cdot c' + f \cdot \sigma'_v \cdot \tan \phi' \quad (5)$$

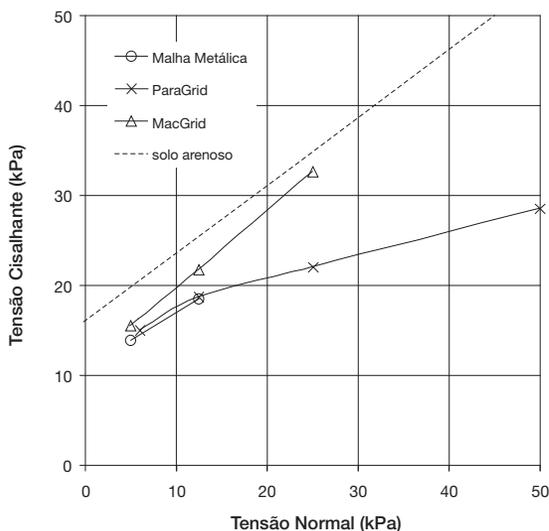


Fig. 9 – Envoltórias de resistência.

Os parâmetros de interface obtidos a partir das envoltórias dos ensaios de arranque estão apresentados na Tabela 5. Em todos os ensaios, a adesão solo-geogrelha assumiu valores entre 10 e 15kPa, fornecendo valores de λ entre 0,69 e 0,96. Os resultados também mostram que a geogrelha MacGrid apresenta o maior valor de ângulo de atrito solo-geogrelha e, conseqüentemente, maior valor de coeficiente de interação (f). Nota-se que, para esta geogrelha, f assumiu um valor superior à unidade, o que pode estar relacionado à parcela de resistência mobilizada nos elementos transversais. Ressalta-se, contudo, que os mecanismos que compõem a resistência ao arranque contribuem

em ambas parcelas da expressão que define a envoltória de resistência. No caso de reforços planos contínuos, como os geotêxteis, o coeficiente f assume valores entre 0 e 1, pois o único mecanismo de interação mobilizado é o atrito superficial entre a manta têxtil e o solo. No entanto, no caso de geogrelhas, a parcela correspondente ao empuxo passivo pode ser bastante significativa.

Tabela 5 – Parâmetros de Resistência na Interface Areia-Geogrelha.

Tipo de Geogrelha	c'_a (kPa)	δ' (°)	λ	f
MacGrid	11,1	40,0	0,69	1,11
ParaGrid	13,7	16,9	0,86	0,40
Malha Metálica	10,8	31,5	0,66	0,81

Os valores do coeficiente de interação (f) obtidos na presente campanha de ensaios foram comparados com os previstos a partir da expressão proposta por Jewell et al (1984), apresentada na equação 6. Esta proposição considera as parcelas de resistência decorrentes da mobilização do atrito lateral e do empuxo passivo nos elementos transversais do reforço:

$$f_J = \alpha_a \cdot \left(\frac{tg\delta}{tg\phi'} \right) + \left(\frac{\alpha_p \cdot e}{s} \right) \left(\frac{\sigma'_p}{\sigma'_n} \right)_{\infty} \frac{1}{2 \cdot tg\phi'} \times F_1 \times F_2 \quad (6)$$

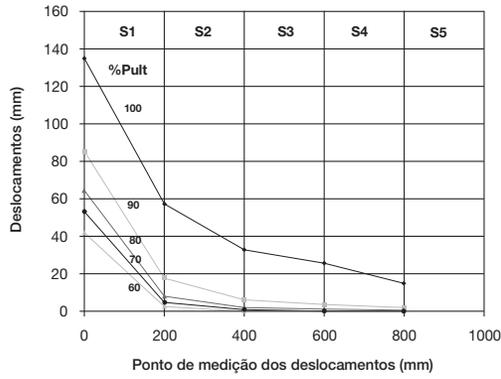
onde: α_a é a fracção da superfície da geogrelha disponível para atrito lateral, α_p é a fracção da largura da geogrelha disponível para mobilização do empuxo passivo dos elementos transversais, F_1 e F_2 são os factores de escala e de forma, respectivamente, e é a espessura dos elementos transversais da geogrelha, e $\left(\frac{\sigma'_p}{\sigma'_n} \right)_{\infty}$ é a resistência passiva mobilizada quando a influência da dimensão dos grãos de solo é desprezível.

Para as geogrelhas MacGrid e ParaGrid, os valores calculados para f_J foram iguais a 0,77 e 0,24, respectivamente. As diferenças observadas com relação aos resultados experimentais podem ser atribuídas às hipóteses adotadas por Jewell et al (1984); em particular, com relação à parcela correspondente à resistência passiva mobilizada, a qual é estimada com base em teoria de capacidade de carga. Por outro lado, observa-se que a geogrelha MacGrid apresentou valor de f_J significativamente superior ao da ParaGrid.

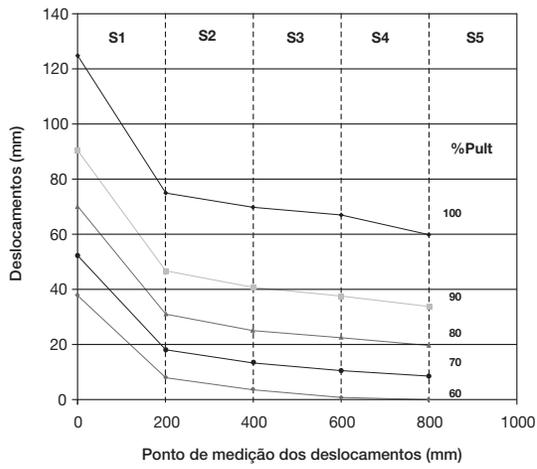
Esta comparação não foi estendida à Malha Metálica pelo fato desta sofrer distorções acentuadas durante o processo de arranque, o que causa alterações significativas na área transversal, disponível para mobilização do empuxo passivo.

3.2 – Deslocamentos Internos

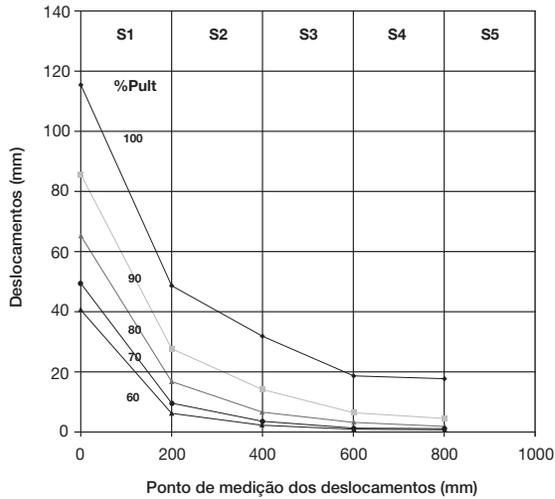
A Figura 10 apresenta a distribuição dos deslocamentos das 3 geogrelhas, em função da localização do instrumento de medição (*tell-tail*), para diferentes percentuais de carga aplicada (60% a 100% da força máxima de arranque) e sob nível de confinamento de 12,5kPa. Nota-se que quanto mais próximo do ponto de aplicação da força de arranque, maior é o deslocamento horizontal medido. O decréscimo dos deslocamentos horizontais indica uma distribuição não uniforme da força de arranque ao longo do comprimento da geogrelha.



(a) Malha Metálica

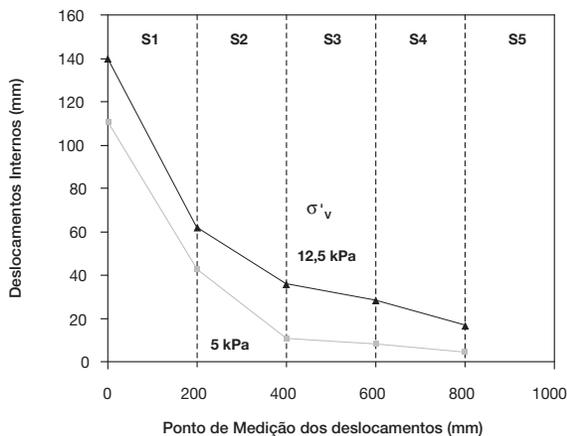


(b) ParaGrid 200/15

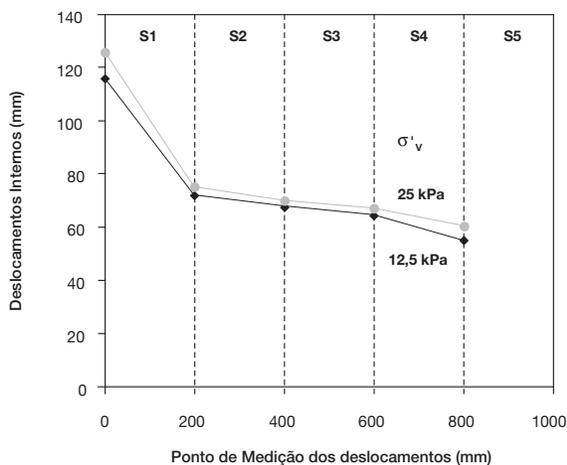


(c) MacGrid 11/3-W

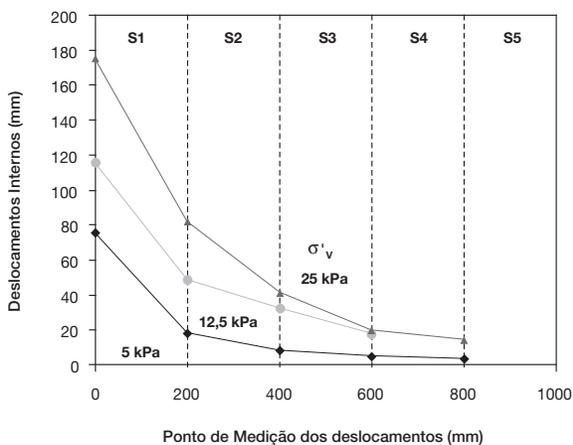
Fig. 10 – Deslocamentos da geogrelha para diversas percentagens da resistência ao arranque.



(a) Malha Metálica



(b) ParaGrid



(c) MacGrid 11/3-W

Fig. 11 – Deslocamentos internos na rotura por arranque.

Na Malha Metálica, observa-se um crescimento acentuado dos deslocamentos principalmente na extremidade frontal da malha. A mobilização dos deslocamentos nas seções finais da geogrelha só ocorreu após a carga de arranque atingir 80% do valor de rotura. Comportamento semelhante foi verificado na grelha MacGrid.

A geogrelha ParaGrid mostrou-se mais sensível à mobilização dos deslocamentos internos, resultando em distribuições aproximadamente paralelas. Quanto mais rígida for a geogrelha, mais uniformes serão os deslocamentos, pois a inclusão tende a se deslocar como um corpo rígido.

A Figura 11 apresenta os deslocamentos internos medidos no instante da rotura por arranque, em função da localização do instrumento de medição (*tell-tail*) e das condições de confinamento.

No caso da grelha ParaGrid, a redução acentuada dos deslocamentos ocorreu somente no trecho inicial. A partir da seção S₂, os deslocamentos são aproximadamente constantes, indicando o deslocamento da malha como um corpo rígido. A influência do confinamento foi desprezível indicando a predominância da parcela da adesão na resistência ao arranque. Cabe ressaltar que, após exumação das amostras, observou-se que a união entre alguns elementos transversais e longitudinais havia se rompido.

Para os ensaios sob confinamento de 12,5kPa e 25kPa, este rompimento foi mais significativo na extremidade posterior da geogrelha. Acredita-se, portanto, que os deslocamentos registrados na seção S₄ não tenham confiabilidade e serão doravante desconsiderados. Já nos ensaios para tensão confinante de 50kPa, a rotura da união entre os elementos longitudinais e transversais foi verificada ao longo de praticamente todo o comprimento da geogrelha, ocasionando a perda dos instrumentos de leitura (*tell-tails*).

A influência do confinamento foi observada nas grelhas Metálica e MacGrid, onde maiores níveis de tensão confinante acarretaram em uma maior mobilização dos deslocamentos. Na grelha ParaGrid, para os níveis de tensão impostos, esta influência foi desprezível.

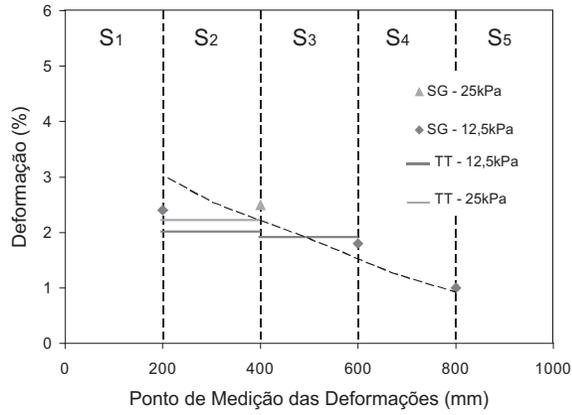
Com base nos deslocamentos internos medidos pelos *tell-tails*, as deformações médias ($\bar{\epsilon}_{i,i+1}$) em cada trecho da geogrelha foram estimadas a partir da diferença entre o registro de 2 pontos consecutivos; isto é:

$$\bar{\epsilon}_{i,i+1} = \frac{(X_i - X_{i+1})}{d}$$

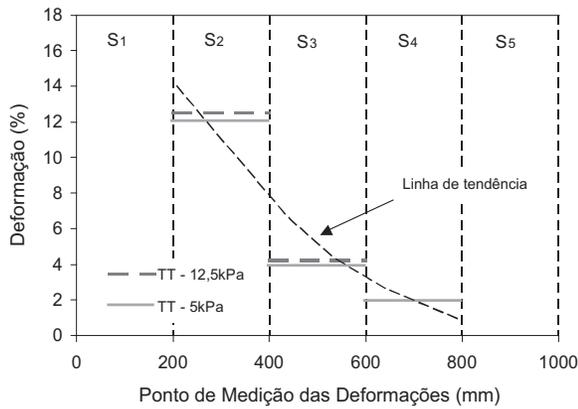
onde: d = distância entre dois medidores de deslocamento (*tell-tails*) consecutivos; X_i = deslocamento medido no i-ésimo *tell-tail* (TT_i).

A Figura 12 apresenta os resultados desta estimativa, em conjunto com as leituras registradas nos *strain-gages*. Nesta Figura, estão também traçadas as linhas de tendência, obtidas a partir do melhor ajuste entre os registros dos *strain-gages* e as deformações estimadas a partir dos *tell-tails*. Ressalta-se que na Malha Metálica não foi possível instalar *strain-gages* e que, na geogrelha ParaGrid, a rotura da união dos elementos transversais e longitudinais, sob tensão confinante de 50kPa, acarretou na perda da instrumentação. Adicionalmente, nesta mesma geogrelha, alguns *strain-gages* não funcionaram satisfatoriamente durante o arranque, para níveis inferiores de confinamento, em virtude da destruição de sua camada de proteção.

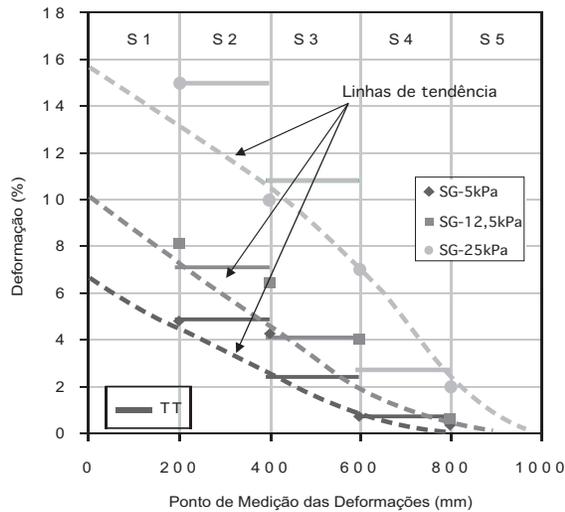
Independente do tipo de geogrelha, observa-se uma redução das deformações com o aumento do embutimento. Comportamento semelhante foi reportado por outros pesquisadores (Teixeira, 1999; Teixeira e Bueno, 2002, Sieira, 2003).



(a) ParaGrid



(b) Malha Metálica



(c) MacGrid 11/3-W

Fig. 12 – Deformações na rotura medidas por *strain-gages* (SG) e estimadas pelos *tell-tails* (TT).

A influência do confinamento foi significativa somente na geogrelha de malha regular (MacGrid). Este tipo de geogrelha foi o único que apresentou indícios da existência de uma parcela referente ao empuxo passivo atuando nos elementos transversais. Os níveis de deformação registrados na Malha Metálica e geogrelha MacGrid foram semelhantes e significativamente superiores aos da ParaGrid, face à diferença de rigidez entre a ParaGrid e as demais geogrelhas (Tabela 2).

No caso da Malha Metálica, os deslocamentos relativos fornecidos pelos *tell-tails* indicaram um aumento atípico de deformação na seção S_4 , para uma tensão confinante de 12,5 kPa. Além das incertezas relacionadas à estimativa das deformações, através de leituras de deslocamento em diferentes pontos da geogrelha, este aumento pode ser também atribuído ao fato da deformação da malha não ocorrer apenas ao longo da direção longitudinal ao arranque. Os hexágonos da malha se distorcem e o ponto de medição se desloca também na direção transversal ao arranque, conforme mostra a Figura 13. Observa-se, ainda, que apesar da influência dos níveis de tensão confinante nos deslocamentos longitudinais (Figura 11), as deformações ao longo desta geogrelha puderam ser representadas por uma única linha de tendência.

Para a geogrelha ParaGrid, uma única linha de tendência também foi representativa das deformações ao longo do comprimento da grelha, para níveis de confinamento de 12,5 e 25 kPa.

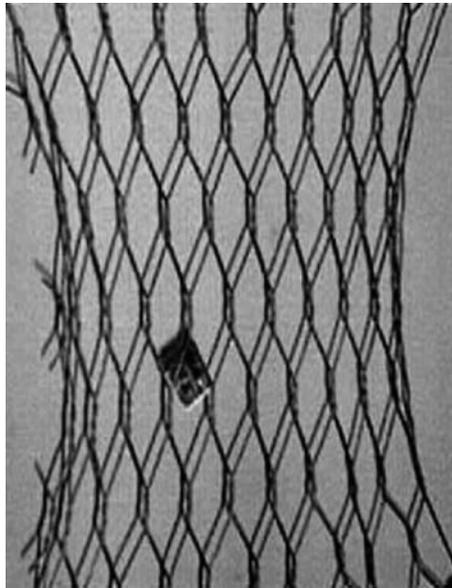
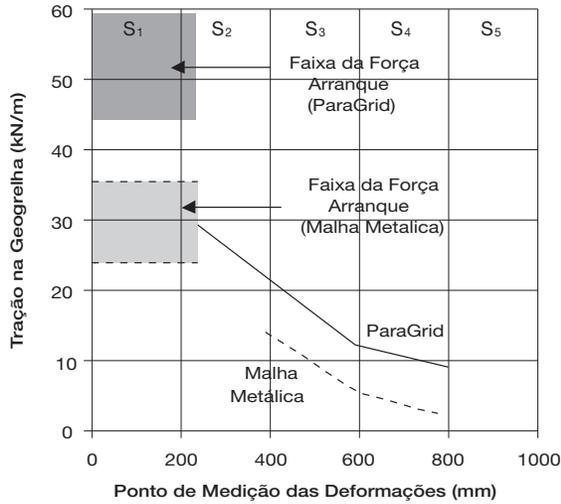


Fig. 13 – Configuração deformada da Malha Metálica ao final do ensaio.

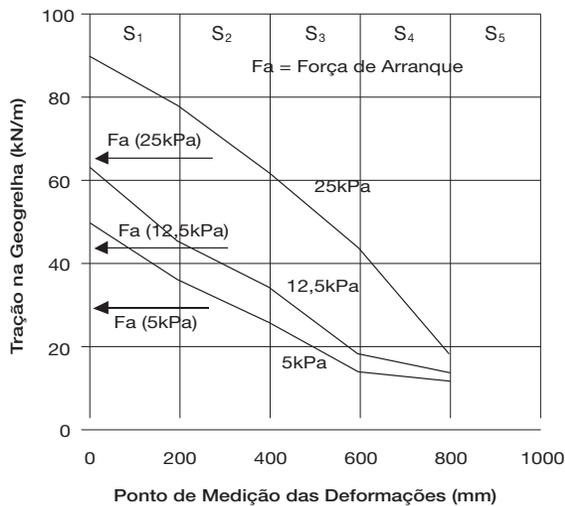
3.3 – Esforços de Tracção na Geogrelha

Os esforços de tracção atuantes ao longo da geogrelha foram estimados relacionando-se as linhas de tendência das deformações na rotura (Figura 12) com os resultados de ensaios de tracção simples (Figura 2).

As distribuições dos esforços de tracção nas 3 geogrelhas estão apresentadas na Figura 14.



(a) ParaGrid e Malha Metálica



(b) MacGrid

Fig. 14 – Esforços de tracção estimados a partir dos resultados de ensaios de tracção simples.

No caso da grelha MacGrid, são mostradas as curvas relativas aos diferentes níveis de confinamento. A estimativa do esforço de tracção na Malha Metálica não pode ser realizada no ponto de medição correspondente a 200mm, uma vez que a deformação calculada ultrapassou a máxima registrada no ensaio de tracção simples.

Nas grelhas ParaGrid e Malha Metálica, os esforços de arranque na garra, no instante da rotura, são superiores aos estimados internamente. Esta redução se deve à elasticidade característica dos geossintéticos. Entretanto, a maior rigidez da grelha ParaGrid deveria resultar numa menor perda de esforço de tracção. Já na geogrelha MacGrid, independente do nível de confinamento, os esforços de tracção na garra foram inferiores aos estimados internamente.

As incoerências observadas são atribuídas às diferenças entre os equipamentos utilizados para os ensaios de arranque e de tracção simples. O mecanismo de fixação da geogrelha (garra) interfere significativamente nos resultados dos esforços de tracção. Este fato foi constatado anteriormente a partir da comparação entre os valores de resistência à tracção determinados na presente pesquisa e os fornecidos pelo fabricante.

Alternativamente, os esforços de tracção na geogrelha podem ser estimados a partir da curva de calibração dos medidores de deformação (strain-gages). Para a calibração dos strain-gages, foi executado um ensaio de tracção simples, com a geogrelha MacGrid, no mesmo equipamento onde foram executados os ensaios de arranque. Neste ensaio, o strain-gage foi colado no centro da amostra. A Figura 15 apresenta a curva de calibração, onde observa-se a força de tracção na rotura igual a 65kN/m, inferior à fornecida pelo fabricante (97kN/m).

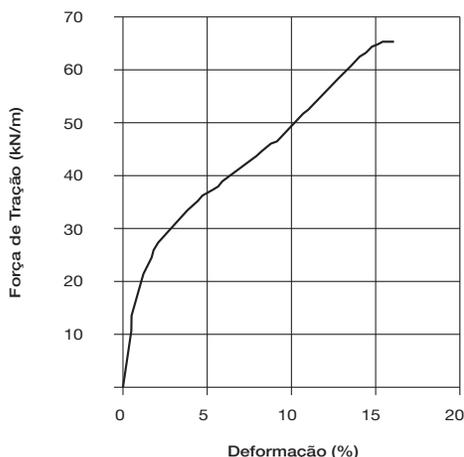


Fig. 15 – Curva de calibração dos *strain-gages* (geogrelha MacGrid).

Na Figura 16, estão apresentados os esforços de tracção, estimados em função da curva de calibração, para os diferentes níveis de tensão confinante. Os resultados indicam uma razoável concordância dos esforços de tracção estimados na extremidade frontal da geogrelha com relação aos registrados na garra de arranque, com exceção do ensaio para tensão confinante de 5kPa.

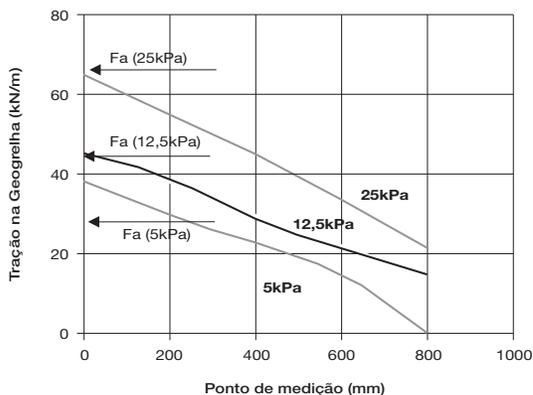


Fig. 16 – Esforços de tracção na MacGrid com base na curva de calibração dos *strain-gages*.

4 – CONCLUSÕES

O presente trabalho discute os resultados de ensaios de arranque executados com 3 geogrelhas distintas (MacGrid 11/3-W, ParaGrid 200/15 e Malha Metálica Hexagonal), imersas em solo arenoso. As geogrelhas MacGrid e ParaGrid são constituídas por tiras de poliéster e a Malha Metálica Hexagonal é constituída por arames de aço de baixo teor de carbono zincado. O processo de mobilização de tensões e deformações ao longo das geogrelhas foi analisado com base na instrumentação adotada, que consistiu em *tell-tails* e *strain-gages*.

Os valores de resistência à tracção são fortemente influenciados pela metodologia de ensaio e, em particular, pelo sistema de fixação da amostra. Ensaios de tracção simples, realizados em amostras não confinadas, forneceram resultados de esforços de tracção na rotura até 3 vezes menores do que os indicados pelo fabricante.

As curvas de carga de arranque vs deslocamento frontal mostraram-se sensíveis ao grau de confinamento. A geogrelha ParaGrid, que possui a maior resistência e rigidez à tracção, apresentou a menor interação com o solo ensaiado. No caso de maciços reforçados, a escolha do tipo de geogrelha deve considerar não apenas as características mecânicas da geogrelha, mas principalmente o nível de interação da inclusão com o solo envolvente. A geogrelha MacGrid apresentou o maior coeficiente de interação solo-geogrelha.

Os deslocamentos internos registrados ao longo do ensaio indicaram que, quanto maior a rigidez à tracção da geogrelha, mais uniforme é a distribuição dos deslocamentos em função do esforço de arranque aplicado. As geogrelhas menos rígidas apresentaram deformações acentuadas na extremidade frontal e, na região mais interna, os deslocamentos só ocorreram na condição próxima à rotura.

A influência do confinamento nos deslocamentos internos foi observada nas geogrelhas Metálica e MacGrid, onde níveis maiores de tensão confinante provocaram uma maior mobilização dos deslocamentos. Na geogrelha ParaGrid, para os níveis de tensão impostos, esta influência foi pouco significativa.

O processo de mobilização das deformações, analisado em função dos registros dos strain-gages e deformações médias, estimadas a partir dos deslocamentos internos medidos pelos tell-tails, mostrou boa concordância entre as duas metodologias. A redução das deformações com o aumento do embutimento para as geogrelhas ParaGrid e Malha Metálica mostrou ser independente do nível de confinamento.

Não se obteve resultados satisfatórios na estimativa da distribuição dos esforços de tracção ao longo da geogrelha, com base em curvas carga vs deformação obtidas em ensaios de tracção simples. Esta metodologia deve ser tentada somente quando os ensaios de arranque e tracção simples são realizados no mesmo equipamento e com o mesmo sistema de fixação (garra) da geogrelha.

O uso da curva de calibração dos strain-gages mostrou-se uma alternativa promissora para a estimativa dos esforços ao longo do comprimento da geogrelha, principalmente, quando a calibração e os ensaios de arranque são executados no mesmo equipamento.

5 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Empresa Maccaferri do Brasil, pelo apoio ao projeto de pesquisa, e ao CNPq (Brasil), pelo apoio financeiro sob forma de bolsa de pesquisa. Os autores agradecem ainda ao Laboratório de Geotecnia do CEDEX (Madri, Espanha), pelo auxílio na execução do programa experimental em cooperação técnica com a PUC-Rio.

6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amorim Jr., W.M. Mecanismos de Interação Solo-Geogrelha. Simpósio Brasileiro de Geosintéticos, ABMS. Brasília, Brasil. pp. 121-139, 1992.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 12824: Geotêxteis: determinação da resistência à tração não confinada em ensaio de faixa larga. Brasil, 1993.
- Castro, D. C. Ensaio de Arrancamento de Geogrelhas no Campo e no Laboratório. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, Brasil, 135p., 1999.
- Christopher, B. R. e Berg, R. R. Pullout Evaluation of Geosynthetics in Cohesive Soils. Geotextiles, Geomembranes and Related Products. A.A. Balkema, Rotterdam/Brookfield, vol.2, pp. 673-676, 1990.
- Díaz, M. E. E. Estudio del Comportamiento Tenso-Deformacional de Geosintéticos en Ensayos de Arrancamiento con Relación al Diseño de Terrenos Reforzados. Tese de Doctorado, Universidad Politécnica de Madrid. 350p., 2000.
- Jewell, R. A.; Milligan, G. W. E.; Sarsby, R. W. e Dubois, D. "Interaction between soil and geogrids". Conference on Polymer Grid Reinforcement, London, pp. 18-30, 1984.
- Juran, I. e Chen, C. L. Soil-Geotextile Pullout Interaction Properties: Testing and Interpretation, pp. 37-47. Transportation Research Record, USA, 1988.
- Koerner, R. M. Designing with Geosynthetics. Prentice-Hall, New Jersey, USA, 761p, 1998.
- Ochiai, H.; Otani, J.; Hiyaschic e Hirai, T. The Pullout Resistance of Geogrids in Reinforced Soils: Geotextiles and Geomembranes. vol. 14, n.1, pp.19-42, 1996.
- Palmeira, E. M. e Milligan, G. W. E. Large Scale Laboratory Tests on Reinforced Sand. Journal Soils and Foundations. Japanese Geotechnical Society, vol. 36, n. 29, pp. 18-30, 1989.
- Saez, J. A. Caracterización Geomecánica de Geotextiles. Curso sobre técnicas generales de refuerzo del terreno y sus aplicaciones. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). Madrid, España, vol.1, pp. 1-29, 1997.
- Sieira, A. C. C. F., Sayão, A. S. F. J. e Sopeña, L. M. Estudio de los Mecanismos de Interacción Suelo-Geomalla a partir de los Resultados de Ensayos de Laboratorio en Equipos de Grandes Dimensiones. 2º. Simposio Nacional de Geosintéticos, pp.173-184, Madrid, España, 2002.
- Sieira, A. C. C. F. Estudo Experimental dos Mecanismos de Interação Solo-Geogrelha. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, Brasil, 2003.
- Teixeira, S. H. C. Construção e Calibração de um Equipamento de Ensaio de Arrancamento de Geosintéticos. Dissertação de Mestrado. USP, São Carlos, Brasil, 157p., 1999.
- Teixeira, S. H. C. e Bueno, B. S. Comportamento de Geogrelhas Implantadas em um Solo Arenoso Fino e Solicitadas ao Arrancamento. Solos e Rochas: Revista Latino-americana de Geotecnia. ABMS / ABGE, São Paulo, Brasil, vol. 25, n. 2, pp. 119-134, 2002.

Apêndice 1. Notação

G_s	Densidade dos grãos
D_{50}	Diâmetro correspondente a 50% da porcentagem do solo em peso
ω_{nat}	Teor de umidade natural
γ_{dmax}	Peso específico aparente seco máximo
γ_{dmin}	Peso específico aparente seco mínimo
D_r	Densidade relativa
c'	Coesão efetiva do solo
ϕ'	Ângulo de atrito efetivo do solo
$\bar{\epsilon}_{i,i+1}$	Deformação média
d	Distância entre dois medidores de deslocamento (tell-tail) consecutivos
X_i	Deslocamento medido no i-ésimo tell-tail
$\hat{\tau}_i$	Resistência ao cisalhamento, por metro linear, estimada a partir das deformações
τ_{SG}	Resistência ao cisalhamento na interface solo-reforço
c'_a	Adesão efetiva na interface solo-reforço
δ'	Ângulo de atrito efetivo na interface solo-reforço
$F_{i-1, i}$	Força de tracção atuante entre os pontos (i-1) e (i)
P	Força de arranque
B	Largura da geogrelha
L	Comprimento de ancoragem da geogrelha
σ'	Tensão normal efetiva
$f; \lambda$	Coefficiente de interação solo-reforço
α_s	Fracção da superfície da geogrelha disponível para mobilização do atrito lateral
α_p	Fracção da largura da geogrelha disponível para mobilização do empuxo passivo dos elementos transversais
F_1	Fator de escala
F_2	Fator de forma
e	Espessura dos elementos transversais
S	Espaçamento entre elementos transversais da geogrelha
$\left(\frac{\sigma'_p}{\sigma'_n} \right)_\infty$	Resistência passiva mobilizada quando a influência da dimensão dos grãos de solo é desprezível