

Comportamento de Geogrelha Instalada em Solo de Baixa Resistência e Submetida ao Arrancamento Cíclico

Marcus Vinicius Weber de Campos,
TDM Brasil – Tecnologia de Materiais, Brasil, e-mail: m.v.campos@hotmail.com

Orencio Monje Vilar,
Escola de Engenharia de São Carlos, USP, Brasil. e-mail: orencio@sc.usp.br

RESUMO: Determinados geossintéticos, como as geogrelhas, são corriqueiramente utilizados no reforço de solos. Em certas aplicações, como no reforço da base de pavimentos ferroviários e rodoviários, por exemplo, esses geossintéticos devem resistir à ação de cargas de tráfego repetitivas, que originam solicitações mais rigorosas do que as observadas em estruturas sujeitas a cargas estáticas. Neste trabalho foram avaliadas as condições de arrancamento de uma geogrelha submetida tanto a carregamentos monotônicos, quanto cíclicos, quando instalada em uma camada de silte argiloso compactado. A caixa de ensaios permitia diversas configurações de carregamento, velocidades de aplicação de carga e programações específicas como tempo de duração da ciclagem e da carga de assentamento, assim como carga máxima e mínima do ciclo. Os ensaios foram instrumentados com células de tensão total e transdutores de deslocamento. A disposição das células de tensão total ocorreu ao longo da horizontal e da vertical no entorno da geogrelha, permitindo verificar a variação das tensões ao longo dos dois sentidos; já o corpo de prova foi instrumentado com fios inextensíveis ao longo de seu comprimento e largura, de modo a avaliar as deformações ao longo do comprimento. Os resultados dos ensaios permitiram avaliar os deslocamentos ao longo dos ciclos de carga, além do módulo de cisalhamento de interface, que reflete a relação entre a tensão de cisalhamento e o correspondente deslocamento relativo da interface solo-geossintético. Os resultados obtidos mostraram que o módulo de cisalhamento de interface aumentou com a tensão normal, sendo ainda dependente da tensão de cisalhamento imposta.

PALAVRAS-CHAVE: Geogrelhas, Carga Cíclica, Resiliência, Reforço, Geossintéticos

1. INTRODUCÃO

Um sistema de solo reforçado comprehende a conjugação do solo com um elemento de reforço, buscando aproveitar as melhores características de cada componente. Várias são as opções de reforço, as quais foram, modernamente, ampliadas com o advento dos geossintéticos, produtos de natureza polimérica utilizados em substituição ao solo ou em adição a ele para cumprir diferentes funções nas aplicações em engenharia. Embora vários geossintéticos possam cumprir essa função, as geogrelhas são os produtos

desenvolvidos exclusivamente para essa finalidade.

Sistemas de solo reforçado são comumente utilizados na construção de estruturas de arrimo e na melhoria da capacidade de suporte de solos de baixa resistência. Estes sistemas estão sujeitos a vários tipos de carregamentos, como cargas estáticas decorrentes do peso próprio da estrutura e de eventuais sobrecargas e cargas cíclicas, tal como pode ocorrer num sistema de solo reforçado utilizado como base de um pavimento ferroviário ou rodoviário, por exemplo.

A interação solo – reforço costuma ser, rotineiramente, analisada por meio de ensaios de arrancamento monotônicos. Entretanto solicitações monotônicas não refletem as solicitações cíclicas que são comuns nas situações anteriormente citadas. Nessa perspectiva, foram criados os ensaios de arrancamento cíclico (Perkins et al, 2004; Cuelho & Perkins, 2005) que permitem medir os deslocamentos originados pelos diferentes ciclos de carregamento e as deformações a eles associadas: as de natureza plástica e as de natureza elástica, estas, comumente, representadas pelo módulo de cisalhamento de interface G_i , utilizado nos métodos de dimensionamento empírico-mecânicos de pavimentos reforçados (Perkins et al, 2004).

Este trabalho se propõe a estudar o desempenho em arrancamento de uma geogrelha de poliéster embutida em um solo de baixa capacidade de suporte, buscando-se verificar o seu comportamento tanto em carregamento monotônico, quanto cíclico e dar continuidade à divulgação de resultados acerca desse tipo de ensaio, cujos primeiros relatos estão em Campos & Vilar (2015).

2. MATERIAIS E MÉTODOS.

2.1 Ensaio de Arrancamento

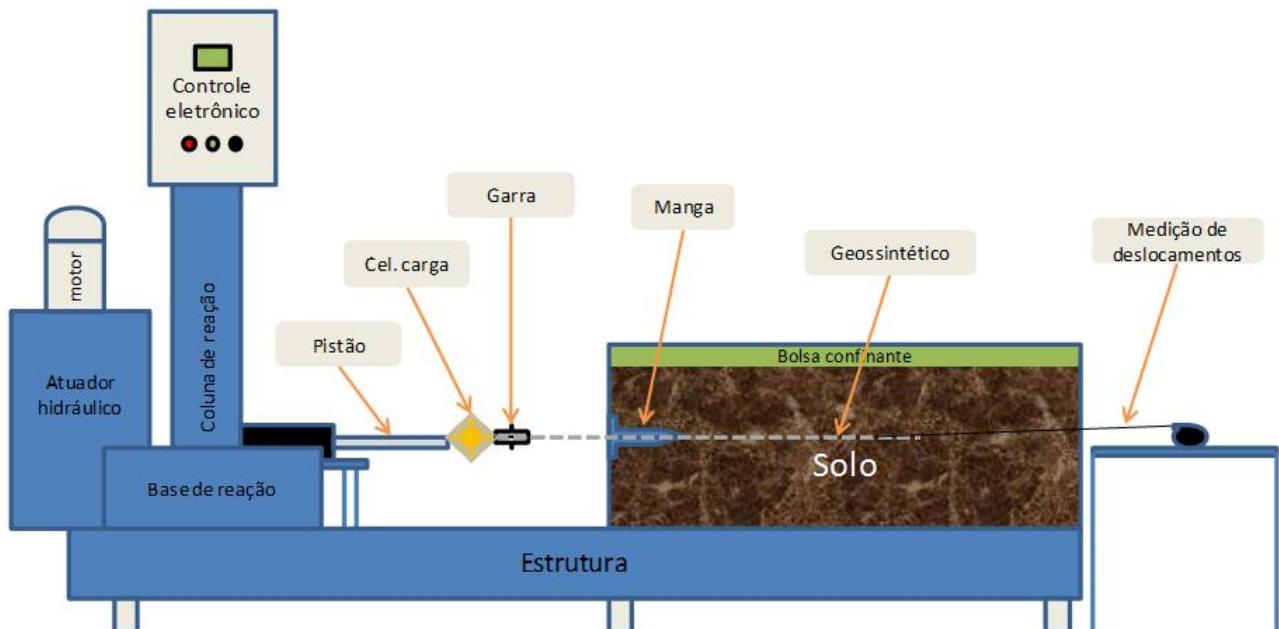


Figura 1 – Esquema do equipamento de ensaios de arrancamento monotônico e cíclico da EESC-USP.

O equipamento utilizado nos ensaios de arrancamento consistia em uma caixa com dimensões de 1,70 m de comprimento, 0,70 m de largura e 0,48 m de altura dotada de um sistema eletro-hidráulico de arrancamento do reforço. A Figura 1 mostra um esquema geral do equipamento montado no laboratório de Geossintéticos da EESC-USP. O sistema eletrônico do equipamento permite diversas regulagens de carregamentos associados a diferentes velocidades de aplicação de cargas e ainda permite diversas configurações de carregamentos, velocidade de aplicação de carga e programações específicas como tempo de duração do carregamento cíclico e da carga de assentamento, bem como a carga máxima e mínima do ciclo. A sequência de ensaios se iniciava com os ensaios de arrancamento monotônico, que forneciam parâmetros para a determinação da envoltória de arrancamento embasado na norma ASTM D 6706-01. A aplicação das tensões normais era feita por meio de ar comprimido aplicado a uma bolsa posicionada sobre o solo e que reagia contra a tampa da caixa do ensaio de arrancamento. As tensões normais de confinamento utilizadas foram de 25, 40, 55 e 75 kPa e a velocidade de arrancamento fixada em 3,6 mm/min.

Os ensaios de arrancamento cíclico foram baseados na norma ASTM 7499-09 que considera a aplicação de 1000 ciclos de condicionamento e 300 ciclos para cada nível de tensão, sendo estas correspondentes a 20, 40 e 60 % da resistência máxima obtida nos ensaios de arrancamento monotônico.

2.2 Geogrelha

A geogrelha ensaiada era de poliéster (PET) de uso corrente para reforço de base de pavimentos, com resistência de 40 kN/m no sentido longitudinal e 30 kN/m no transversal.

A Figura 2 mostra a geogrelha ensaiada, destacando-se que 51 % da área da geogrelha corresponde a área livre e 49 % a área preenchida (Tabela 1), o que permite maior interação entre as camadas de solo adjacente, gerando maior imbricamento do solo e, consequentemente, aumentando a ancoragem.

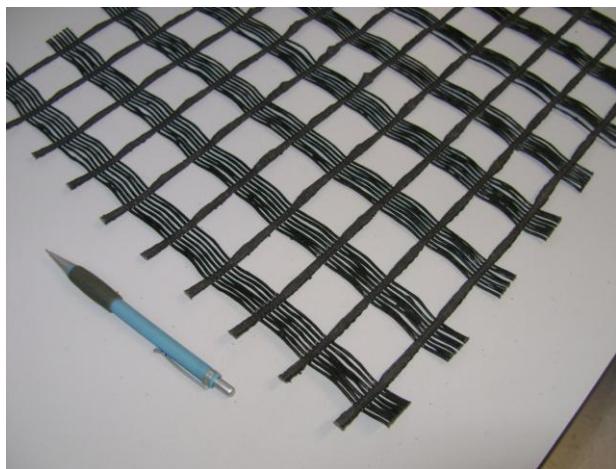


Figura 2: Detalhes da geogrelha utilizada na pesquisa.

O corpo de prova de geogrelha apresentava dimensões de 510 mm de comprimento e 376 mm de largura e era monitorada como mostrado na Figura 3(b). Assim, no decorrer

do ensaio eram medidos os deslocamentos por meio de fios inextensíveis fixados em diversos pontos do reforço ao longo do seu comprimento (L1; L2; D1 a D6), os quais, por sua vez, eram ligados a transdutores de deslocamentos, com acurácia de 0,001 mm, localizados na parte traseira da caixa (externamente).

Tabela 1: Características geométricas da geogrelha.

Elementos (mm)			Área (%)	
	Largura	Espessura	Distância	Livre Preenç.
L	5,26	1,02	32,35	
T	20,43	1,43	33,35	51,0 49,0

L – longitudinal; T – transversal

Concomitantemente aos deslocamentos, eram medidas as tensões totais que envolviam o reforço, por meio de células de tensão total (H1 a H3 e V1 a V3) dispostas conforme ilustrado na Figura 3(a).

2.3 Solo

Foi utilizado silte argiloso compactado cujas características estão listadas na Tabela 2 e que apresentava baixa capacidade de suporte, com valores de CBR inferiores a 5 (Correia, 2014).

A umidade do solo foi previamente ajustada para atingir um desvio de umidade de $\pm 2\%$ em torno da umidade ótima. Após homogeneização da umidade, o solo foi compactado manualmente, em camadas de 10 cm de altura, até atingir um grau de compactação de 96 % em relação ao Proctor Normal.

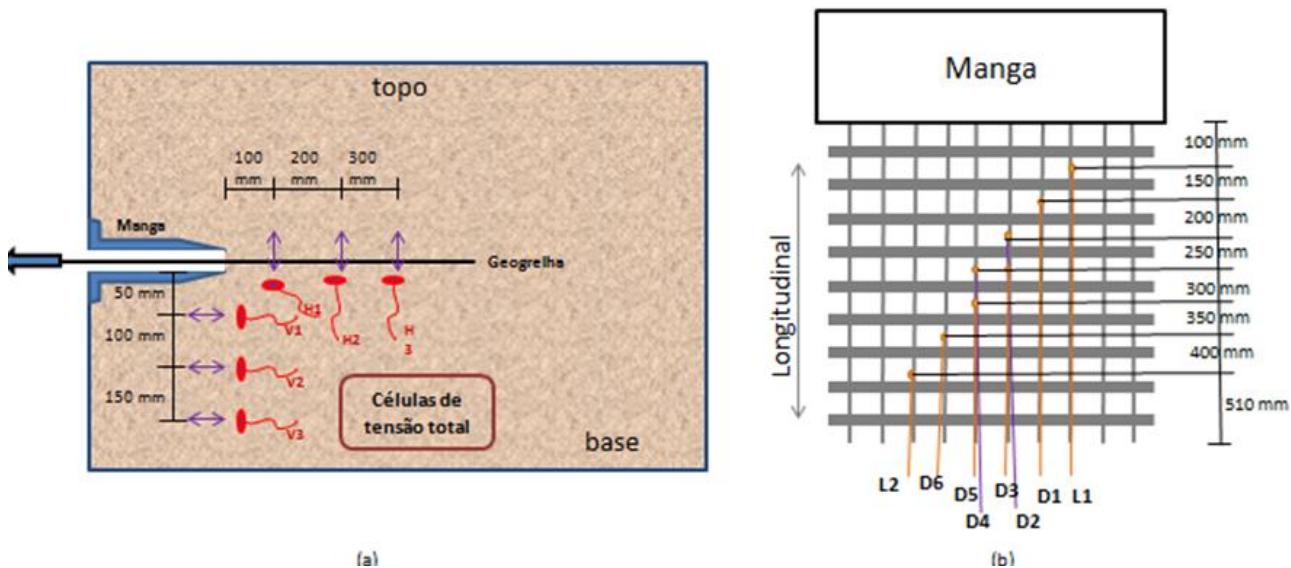


Figura 3 - Arranjo das células de tensão total (V₁, V₂, V₃, H₁, H₂ e H₃) e pontos de medidas de deslocamento (L₁, L₂, D₁, D₂, D₃, D₄, D₅ e D₆).

Tabela 2: Características do solo utilizado.

Ensaio	Unidade	Valor	Norma Técnica
Massa específica dos sólidos	γ_s (kN/m^3)	30,06	ABNT 6508
Compactação Proctor normal	$\gamma_{d,máx}$ (kN/m^3)	15,10	ABNT NBR 7182
	$W_{ót}$ (%)	30	
	Argila (%)	35	
	Silte (%)	42	
Granulometria conjunta	Areia fina (%)	11	ABNT NBR 6502
	Areia média (%)	10	
	Areia grossa (%)	2	
	LL (%)	67	MB 30
Limites de consistência	LP (%)	38	MB 31
	IP	29	
	LC (%)	26,6	ABNT MB 55
Classificação	MH	SUCS	

conjunto, em relação às outras duas tensões confinantes, porém a máxima força ainda é próxima da observada nas outras tensões confinantes.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES.

3.1 Ensaio de Arrancamento Monotônico

A sequência de ensaios de arrancamento monotônico gerou três curvas força-deslocamento mostradas na Figura 4. Nota-se que, apesar das tensões normais de confinamento diferentes, as curvas tenderam a se aproximar, tanto na forma, como nos valores máximos. Apenas na tensão de normal 55 kPa é que se observa um enrijecimento do

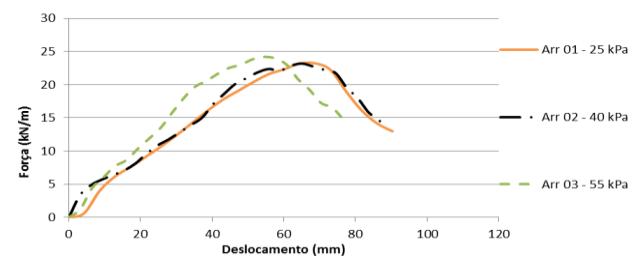


Figura 4 – Curvas dos ensaios de arrancamento monotônico sob diferentes tensões confinantes (25, 40 e 55 kPa).

A Figura 5 mostra as forças associadas aos deslocamentos em diversos pontos ao longo da geogrelha, lembrando-se que o sensor L1 situa-se próximo à garra de arrancamento e L2 no final do embutimento, ou seja, no local mais distante ao ponto de aplicação das cargas. Dessa forma, nota-se que os deslocamentos começam a ocorrer na parte

mais próxima à garra, como era esperado, e com o andamento do ensaio os sensores próximos entre si mostram uma tendência de movimento da mesma ordem de grandeza. As diferentes mobilizações de deslocamento ao longo da distância permitem avaliar qual comprimento do reforço é solicitado com uma referente tensão de arrancamento.

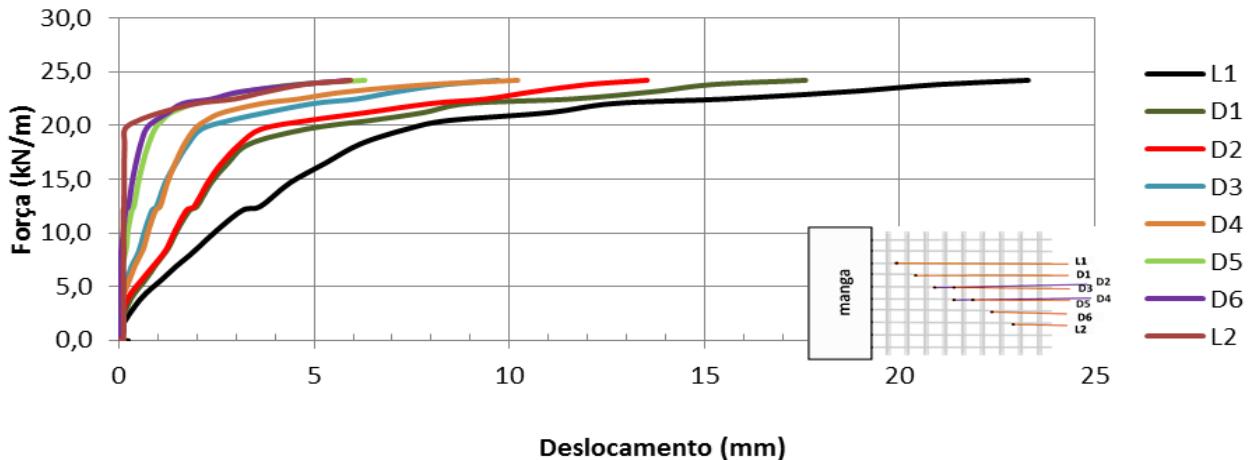


Figura 5: Forças e deslocamentos em diversas posições da geogrelha.

De uma forma geral, nota-se que os deslocamentos tendem a ser maiores na parte frontal da geogrelha, e diminuem à medida que se caminha em direção à parte mais distante da manga de aplicação das cargas. Ainda que com diferentes mobilizações de deslocamento, é interessante notar que a cerca de 20 kN/m ocorre uma inflexão em todas as curvas força – deslocamento, indicando, provavelmente, o início do deslizamento da interface geogrelha – solo. A partir desse valor de força, os deslocamentos tendem a aumentar consideravelmente, porém com pequena variação nas forças. Desde o início do ensaio até seu término é possível verificar que a parte frontal do reforço (L1) se desloca proporcionalmente mais do que a parte traseira (L2), mostrando a continuidade dos deslocamentos ao longo do corpo de prova e que o comprimento associado ao sensor L2 já é suficiente para promover uma efetiva ancoragem do sistema, pois nesta posição, as forças crescem a uma razão da ordem de 20

kN/m com deslocamento de 0,1 mm, muito mais alta quando comparada à razão de crescimento do sensor L1, da ordem de 15 kN/m para um deslocamento de 5 mm.

A Figura 6 mostra os dados da Figura 5, agora vistos sob outra perspectiva, ou seja, a variação dos deslocamentos com a distância em relação à aplicação da carga. Assim, a cada nível de esforços aplicados ao corpo de prova, foram registradas as deformações ao longo de seu comprimento de embutimento, mostrando qual comprimento de reforço era necessário para dissipar as tensões. Pode-se notar que com força de 2,5 kN/m cerca de 150 mm de comprimento do reforço são solicitados, 290 mm do reforço são solicitados quando a força sobe para 5 kN/m e com a força de 10 kN/m mais do que 360 mm da amostra é necessária para dissipar as tensões. A partir desta solicitação, os deslocamentos são registrados ao longo de todo o corpo de prova, a uma taxa maior na

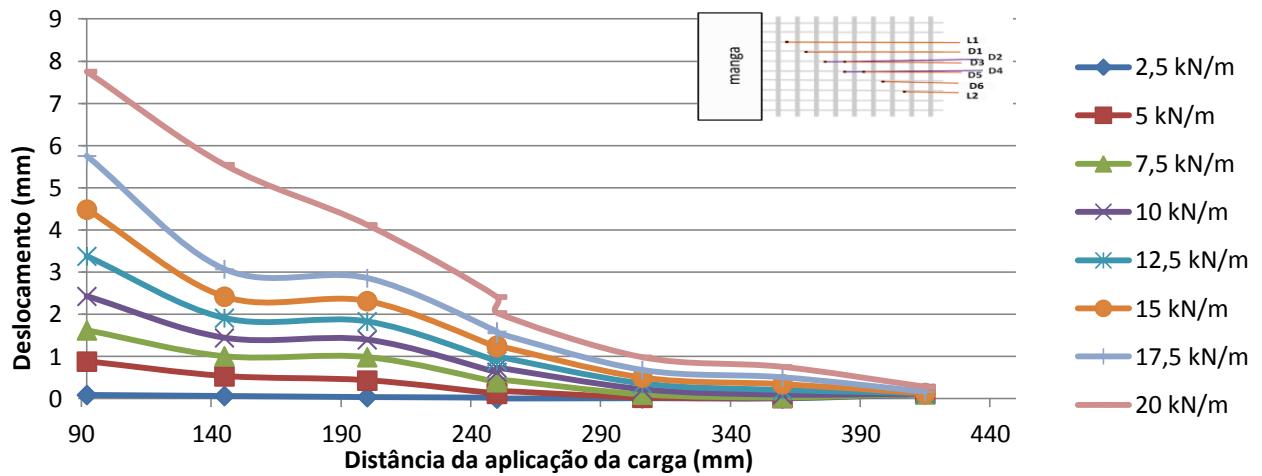


Figura 6: Variação dos deslocamentos com a distância de aplicação da carga.

parte próxima à aplicação da carga e ínfima em seu oposto, até o ponto de arrancamento, onde ocorre aumento acentuado dos deslocamentos por todo o reforço.

Como os valores de força máxima dos ensaios de arrancamento ficaram muito próximos, para estabelecer os níveis de ciclagem foi considerada a força média destes ensaios, de 23,6 kN/m, para estabelecer as forças parciais a utilizar nos ensaios de arrancamento.

3.2 Arrancamento Cíclico

Na realização dos ensaios cíclicos, utilizaram-se forças correspondentes a 20, 40, 60 e 80 % da força máxima de arrancamento. Foi

possível utilizar estes quatro níveis de força de arrancamento, pois se percebeu que o ancoramento do reforço pelo solo se mantinha com o carregamento cíclico, devido ao nível de interação deste solo coesivo com o reforço, aos relativamente baixos níveis de deslocamento registrados e a pouca perda de material com a ciclagem o que acabou possibilitando a realização adicional da ciclagem com 80 % da $F_{máx}$. A execução dos ensaios cíclicos forneceu um comportamento de acúmulo de carga e deslocamento ao longo do tempo, como pode ser visto na Figura 7 a seguir.

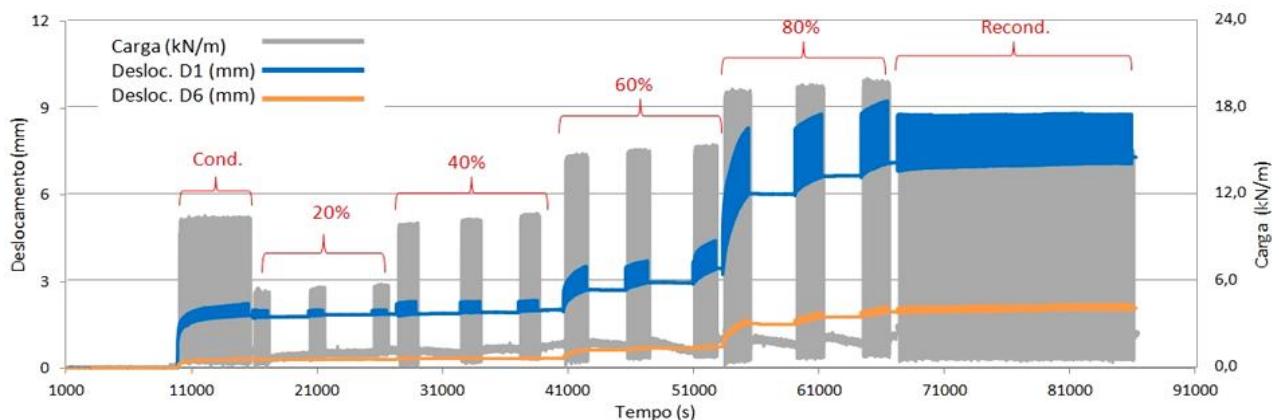


Figura 7: Comportamento do carregamento combinado com os deslocamentos frontal e traseiro ao longo do tempo, no ensaio de carregamento cíclico.

Os sensores combinados com a carga ao longo do tempo foram selecionados devido ao posicionamento em relação à aplicação da

carga e ao final do embutimento da amostra de maneira equidistantes às bordas frontais e traseiras do reforço. Estes sensores são o D2 e D5, e visam representar o deslocamento

médio da porção frontal e traseira do reforço com a continuidade dos ciclos.

O início das ciclagens (condicionamento: 40 % da força máxima e tensão confinante de 40 kPa) gerou grande parte dos deslocamentos registrados posteriormente nas ciclagens com tensões de 20 e 40 % da carga máxima. Como os ensaios de arrancamento geraram cargas de arrancamento próximas, mesmo submetidos a tensões confinantes diferentes, as curvas envoltórias são praticamente retas e assim a mudança de tensões confinantes durante os ensaios não é relevante, sendo mais perceptíveis as mudanças nas tensões de arrancamento cíclico.

Com o aumento das tensões cíclicas para o nível de 60 % da força máxima, os níveis de deformação no reforço aumentam conforme as ciclagens, porém, em um nível ainda relativamente baixo. Este ritmo de deformações possibilitou a execução de um quarto nível de carregamento, de 80 % da resistência máxima, que apresentou um aumento mais acentuado de deformações (cerca de 4 vezes a deformação inicial) mas ainda sem tendência visível de ruptura pois as deformações praticamente se mantinham.

Com o final do último período de ciclagem foi realizado um ciclo adicional denominado Recondicionamento, com as mesmas características utilizadas no condicionamento (40 % da força máxima e tensão confinante de 40 kPa). Neste período de ciclagem o comportamento foi mais estável, demonstrando ligeira tendência de diminuição da amplitude dos deslocamentos ao longo do tempo.

A representação das deformações elásticas recuperáveis ou resilientes é realizada por meio do módulo resiliente de cisalhamento de interface, G_i , (Cuelho & Perkins, 2005) que considera o deslocamento médio do corpo de prova (entre parte frontal e traseira). Quando este deslocamento médio é representado sequencialmente é gerado um gráfico com forma semi-elíptica que tende a retornar para próximo à posição inicial, se deslocando o equivalente à deformação acumulada com as ciclagens.

A representação do ciclo 1 ao 300 é ilustrado na Figura 8, referente a 40 % da força máxima e tensão confinante de 40 kPa.

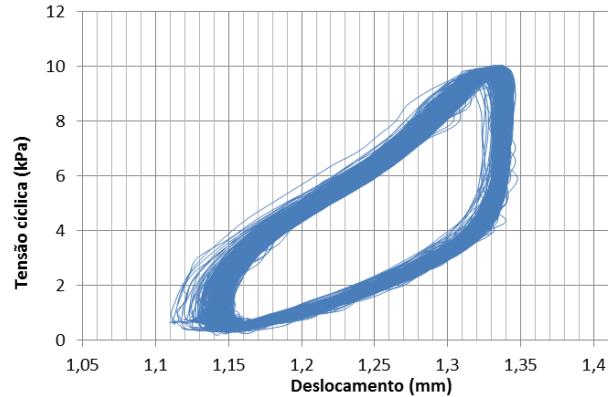


Figura 8: Deslocamento médio do reforço ao longo dos 300 ciclos a 40 % da F_{\max} e tensão, σ , de 40 kPa.

Nota-se que os maiores deslocamentos ocorrem no início das ciclagens e tendem a reduzir-se com o aumento dos ciclos. Para cada sequência de ciclagem o tratamento era repetido e os dez últimos ciclos eram representados e possibilitavam as medições do módulo de cisalhamento de interface, conforme mostrado na Figura 9.

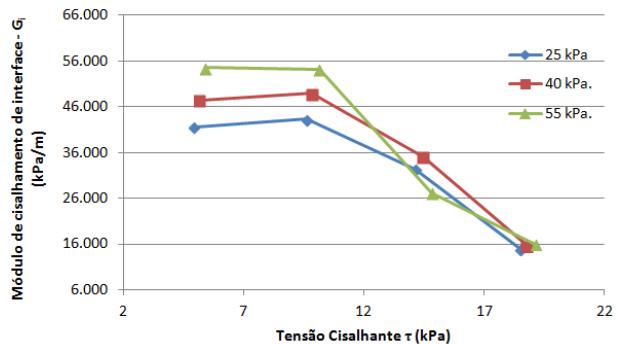


Figura 9: Módulo de cisalhamento de interface versus tensão cisalhante, para cada nível de confinamento.

Nota-se que os módulos sofrem alguma influência da tensão confinante nos menores níveis de tensão cisalhante empregados, entre 5 e 12 kPa, aproximadamente. Os valores médios nessa faixa de tensão cisalhante são da ordem de 50.000 kPa/m. Após 12 kPa, o efeito da tensão confinante se desvanece e os valores de módulo tendem a reduzir-se sensivelmente, chegando a 16000 kPa/m para tensão cisalhante da ordem de 20 kPa. Estes valores são inferiores aos valores relatados na

literatura. Empregando um reforço mais rígido (Polipropileno) e corpos de prova curtos e largos, com cerca de 80 x 480 mm, respectivamente, Perkins et al (2004) e Cuelho & Perkins (2005), relatam módulos cisalhantes da ordem de 100.000 kPa/m. Provavelmente esta diferença entre esses valores esteja associada aos diferentes solos usados; ao polímero base do reforço utilizado neste estudo (poliéster), que é consideravelmente menos rígido, e à geometria do corpo de prova, que nesta pesquisa eram mais compridos e largos, com 510 x 376 mm. Assim, mesmo com área semelhante, as forças distribuídas em menor número de elementos mais longos pode ter gerado tensões maiores nos elementos do corpo de prova mais longo, assim como no solo de entorno. Como decorrência, podem ter surgido maiores deformações e uma redução dos módulos cisalhantes obtidos no presente estudo. Estudos adicionais envolvendo diferentes geogrelhas e dimensões de corpos de prova se fazem necessários para elucidar o comportamento observado nos ensaios.

4. CONCLUSÃO

O monitoramento dos deslocamentos ao longo do corpo de prova nos diferentes ensaios mostrou que no silte argiloso utilizado o reforço se move em seções ao longo do seu comprimento, o que pode ser observado através dos deslocamentos “aos pares” registrados nos sensores próximos. Pode ser observado também um deslocamento maior quanto maior a proximidade com a fonte das forças, como esperado. Apesar da baixa capacidade de suporte do solo (MH) observou-se um bom nível de intertravamento do reforço, que pode ser comprovado através da tendência de estabilização das deformações ao longo do tempo (principalmente a baixas solicitações) e possibilitando ainda a realização de um quarto nível de ciclagem, de 80 % da resistência máxima.

Os módulos de cisalhamento de interface foram ligeiramente afetados pela tensão confinante para tensões cisalhantes entre 5 e 12 kPa. Para tensões cisalhantes maiores, o

efeito do confinamento desvaneceu-se e os módulos cisalhantes tenderam a diminuir de forma significativa. Variações no tipo de solo, composição da geogrelha e tamanho dos corpos de prova podem ter provocado valores de módulo menores que os poucos valores relatados na literatura, fazendo-se necessário mais ensaios para elucidar esse pontos.

5. AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece ao CNPq pela bolsa de Mestrado concedida.

6. REFERÊNCIAS

- ASTM D 6706 (2001) - *Standard Test Method for Measuring Geosynthetic Pullout Resistance in Soil*
- ASTM D 7499/D7499M (2009) - *Standard test method for measuring geosynthetic-soil resilient interface shear stiffness*
- Campos, M.V.W. de; Vilar, O.M. (2015) *Módulo de Cisalhamento de Interface de Geogrelha Obtido em Ensaios de Arrancamento Cíclico*. VII Congresso Brasileiro de Geossintéticos - REGEO, Brasília, DF, Brasil, 6 p.
- Correia, N. S (2014). *Performance of flexible pavements enhanced using geogrid-reinforced asphalt overlays*. (2014). Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 205 p.
- Cuelho, E.V.; Perkins, S.W. (2005) - *Resilient interface shear modulus from shortstrip, cyclic pullout tests*. In: M.A. Gabr, J.J. Bowders, D. Elton and J.G. Zornberg (Editors). ASCE, Austin, Texas, USA, pp. 21-21.
- Perkins, S.W. et al. (2004) - *Development of Design Methods for Geosynthetic Reinforced Flexible Pavements*. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, FHWA Report Reference Number DTFH61-01-X-00068, Washington D.C., USA.