DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/22

Avaliação da Interação Solo-Reforço em Ensaios de Arrancamento Cíclico de Geogrelhas em Base de Pavimento Asfáltico

Marcus Vinicius Weber de Campos
Especialista Geotecnia CCR/ Motiva, Jundiaí, 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: Geossintéticos aplicados para reforço de base de pavimentos ou taludes reforçados devem resistir a repetitivas cargas de tráfego, sob condições mais rigorosas do que as observadas em estruturas estáticas. Neste estudo foram avaliadas as condições de ancoragem de uma geogrelha de reforço por meio de ensaios de arrancamento, onde foram medidos os deslocamentos associados ao carregamento repetitivo, sobre diferentes confinantes. A caixa de ensaios foi instrumentada com células de tensão total, transdutores de deslocamento e LVDTs, para realizar ensaios de arrancamento sobre diferentes níveis de carga de ciclagem e a amostra utilizou fios inextensíveis para avaliar as deformações ao longo do reforço. Os ensaios foram realizados com o reforço ancorado em uma BGS (Brita Graduada Simples) faixa “C”, comumente usada em bases de rodovias. Os resultados mostram que a ciclagem danificou a amostra antes do final previsto do ensaio. Os módulos de cisalhamento de interface foram diferentes dos relatados na literatura, os deslocamentos não se estabilizaram e o comportamento foi dependente da tensão de confinamento e tensão de cisalhamento.

PALAVRAS-CHAVE: Reforço, Geogrelha, Pavimento, Interação, Arrancamento Cíclico.

ABSTRACT: Geosynthetics used for pavement base reinforcement or reinforced slopes must withstand repetitive traffic loads under conditions more rigorous than those observed in static structures. This study evaluated the anchorage conditions of a reinforcement geogrid through pull-out tests, measuring displacements associated with repetitive loading under various confining pressures. The test box was instrumented with total stress cells, displacement transducers, and LVDTs to conduct pull-out tests at different cyclic load levels, while the sample utilized inextensible wires to assess deformations along the reinforcement. The tests were performed with the reinforcement anchored in a "Grade C" graded crushed stone (BGS)—a material commonly used in highway base layers. The results indicate that cyclic loading damaged the sample before the scheduled end of the test. Interface shear moduli differed from those reported in the literature, displacements did not stabilize, and the behavior was dependent on both confining stress and shear stress.

KEYWORDS: Reinforcement, Geogrid, Pavement, Interaction, Cyclic Pullout

1 INTRODUÇÃO

Vias trafegáveis são dimensionadas a partir de parâmetros como resistência, deformabilidade e o acúmulo das deformabilidades (resiliência) dos solos de fundação em suas diversas camadas, gerando assim como resposta uma espessura mínima necessária de capa (para vias pavimentadas), de base, sub-base e subleito, por vezes em diversas camadas diferentes a fim de dissipar as tensões provenientes dos veículos. São considerados ainda fatores como o volume de tráfego, representado pela quantidade de passadas do veículo padrão e o peso dos veículos para os quais a via é projetada, condições climatológicas entre outros.

Comumente a base e/ou sub-base de vias utiliza materiais granulares como Brita Graduada Simples (BGS), as vezes em diversas faixas e camadas diferentes devido à sua maior capacidade de dissipação de tensões do que solos comuns, buscando assim dissipar e diminuir o nível de tensões em uma espessura menor possível (por fins econômicos e ambientais).

O advento tecnológico dos geossintéticos tem atuado nesta linha de reforço de pavimentos de forma a reduzir ainda mais a espessura destas camadas de BGS, mantendo ou diminuindo as tensões que chegam às

camadas inferiores e assim economizando recurso natural cada vez mais escasso e caro, de maneira sustentável e ambientalmente correta.

Com os reforços de geogrelhas inseridos no meio granular vêm a necessidade de se conhecer o comportamento e a interação entre estes materiais. Comumente esta interação é obtida através de ensaios de arrancamento monotônico, que reflete a interação no arrancamento contínuo e mede uma movimentação relativa entre os materiais de maneira constante. Tal ensaio pode não representar a realidade pois em campo o que ocorre pontualmente em cada parte do reforço é um ciclo de breve carregamento e descarregamento, devido à componente elástica inerente a cada material, que pode ser melhor representado por meio de ensaios de arrancamento cíclico. Sob essa ótica foram criados os ensaios de arrancamento cíclico (Perkins et al, 2004; Cuelho & Perkins, 2005) onde eram medidos os ciclos de carregamentos e suas respectivas deformações. As deformações são compostas por uma parcela plástica (permanente) e uma parcela elástica (não permanente), que podem ser representadas através do módulo de cisalhamento de interface G_i. Tal parâmetro é base para cálculos empírico-macanísticos em estruturas de pavimentos reforçados (Perkins et al, 2004), e consta em referencias normativas nacionais (DNIT-ME 134 (2010)).

Esta presente pesquisa tem a finalidade de avaliar a interação de um sistema de reforço com geogrelha de poliéster embutido em um solo granular (BGS faixa C do DER) utilizando as metodologias existentes na literatura tanto em relação ao arrancamento monotônico quanto cíclico e assim mensurar o parâmetro G_i, contribuindo com informações sobre diferentes tipos de solos e complementando as primeiras informações relatadas por Campos & Vilar (2015) e posteriormente Campos & Vilar (2016), onde foram apresentados os comportamentos de reforços em solos arenosos e Silto-argilosos, respectivamente, com seus respectivos módulos G_i, resistências, deformações entre outros.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Caixa de ensaios

O dispositivo utilizado para a realização dos ensaios denominado caixa de ensaios era dotado de um sistema de carregamento de arrancamento eletro-hidráulico programável (Figura 1), situado a meia altura e longitudinalmente à caixa de ensaios, que continha dimensões internas de 1,70m de comprimento, por 0,48m de altura e 0,70m de largura, de modo que o reforço de 0,510m de comprimento por 0,376m de largura não sofresse influência das paredes de entorno durante os ensaios.

A caixa de ensaios apresenta ainda um sistema de acréscimo de tensão confinante por meio de uma bolsa alimentada por ar comprimido, alcançando a tensão máxima acima de 100kPa.

Para controle da influência das paredes e da manga por onde era solicitada a amostra foram utilizadas células de tensão total dispostas próximas e ao longo da amostra na horizontal e na vertical e nomeadas “H” e “V” respectivamente.

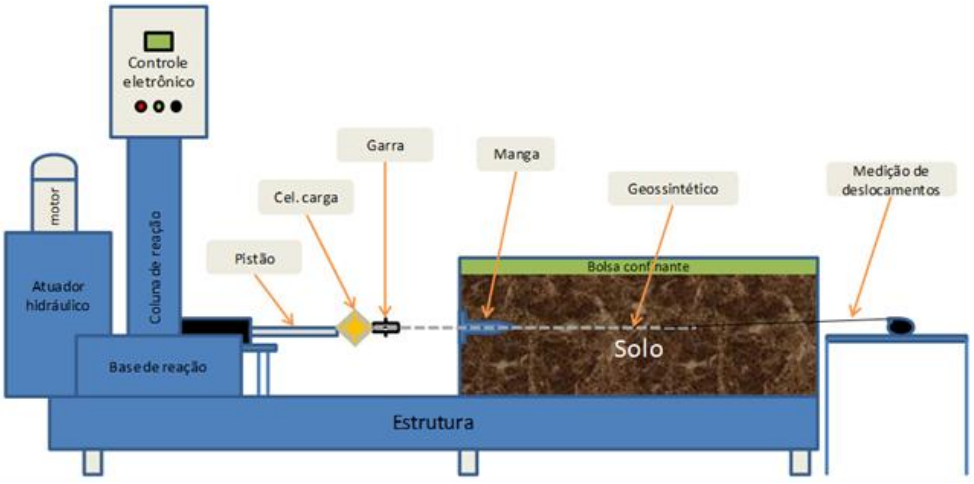


Figura 1. Esquema do equipamento de ensaios de arrancamento monotônico e cíclico da EESC-USP. (Campos & Vilar 2016).

2.2 Geogrelha de reforço

O material geossintético de reforço utilizado foi uma geogrelha de poliéster (PET) com resistência de 40kN/m por 30kN/m no sentido longitudinal e transversal respectivamente, comumente utilizada como reforço de base de vias, entre outros usos de solo reforçado, e também utilizada em Campos & Vilar (2015) e em Campos & Vilar (2016). Este reforço apresentava abertura de 51% que permite um imbricamento eficiente entre as camadas adjacentes ao reforço.

A geogrelha era instrumentada, em cada ensaio, com fios inextensíveis fixados nos filamentos de cada elemento. Este sistema era conduzido para fora da caixa de ensaios, no sentido oposto ao do arrancamento (parte traseira) e conectado a transdutores de deslocamentos com precisão de 0,001 mm, nomeados conforme a Figura 2 a seguir.

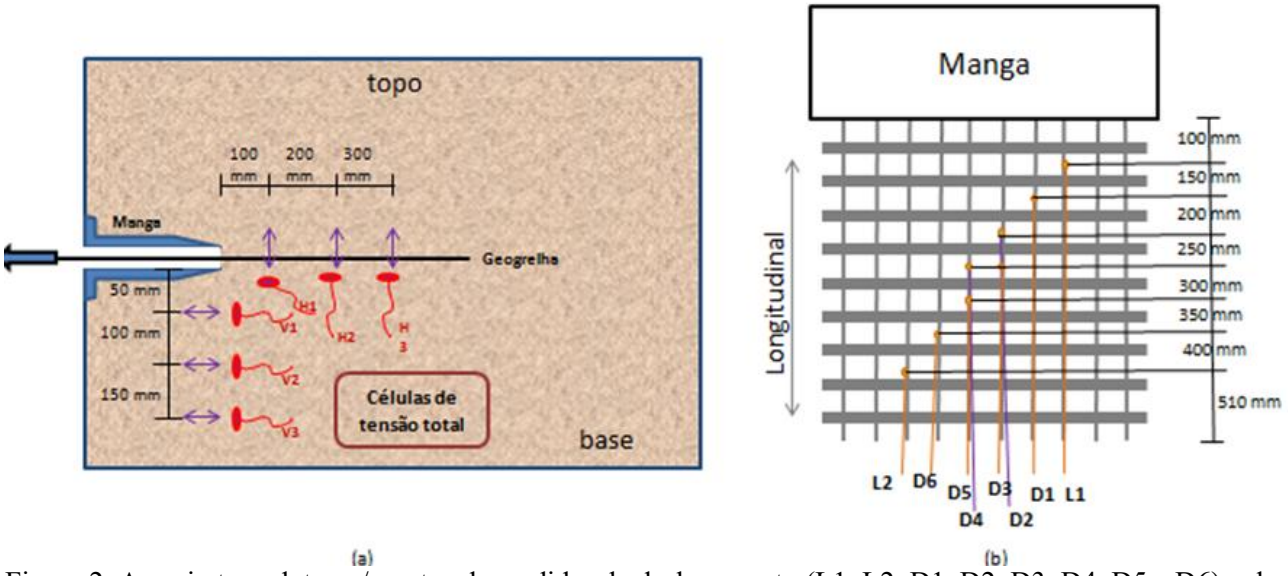


Figura 2. Arranjo transdutores/ pontos de medidas de deslocamento (L1, L2, D1, D2, D3, D4, D5 e D6) e das células de tensão total (V1, V2, V3, H1, H2 e H3), (fonte: Campos & Vilar 2016).

2.3 Solo granular

O solo granular adotado foi uma BGS faixa C segundo classificações do DER, também muito utilizado para fundação de vias devido ao seu alto nível de dissipação de tensões e estabilidade física e química.

A composição deste solo foi "montada" a partir da combinação de três materiais com granulometrias diferentes, sendo pedra 1", pedrisco e pó de pedra, que foram combinados em suas devidas porcentagens, gerando um novo material (enquadrado na faixa característica da gradação C das normas DER ET-DE-P00/008 (2005). A compacidade relativa obtida nos ensaios foi de 94% e a umidade do solo era de 1%.

2.4 Ensaio de arrancamento monotônico

O ensaio de arrancamento foi baseado na norma ASTM D 6706-01 e era o ensaio base da sequência, iniciando-se com tensão confinante de 25, passando a 40 no próximo ensaio e por último 55kPa, que são tensões próximas às encontradas à profundidade da base de vias segundo normas DNER ME 131 (1994) e DNIT ME 134 (2010). O reforço era arrancado a uma velocidade constante de 3,6mm/min.

A realização desta série de ensaios gerava uma envoltória de arrancamento, onde eram combinadas a força de arrancamento e a deformação, cujos respectivos pontos máximos geravam uma reta (envoltória de arrancamento).

2.5 Ensaio de arrancamento cíclico

A partir do momento que se têm a envoltória de arrancamento era montado novo ensaio com as mesmas configurações de montagem do corpo de prova anteriores (arrancamento monotônico), alterando-se a forma de arrancamento agora de acordo com a norma ASTM D 7499-09, que pede a aplicação breve de carregamento e relaxamento à uma frequência de 1Hz, especificando ainda o número de ciclos e sequências de ciclagem. O início do teste se dava com a aplicação de 1000 ciclos denominados condicionamento e após este deveriam ser aplicados, para cada nível de ensaio, 300 ciclos. Na série pesquisada foram utilizadas tensões de arrancamento cíclicas da ordem de 20, 40 e 60% da resistência máxima ao arrancamento para cada tensão confinante, e as tensões confinantes foram as mesmas utilizadas nos ensaios de arrancamento (25, 40 e 55kPa).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Arrancamento monotônico

O arrancamento monotônico realizado na BGS gerou curvas de força versus deslocamento, que apesar da variação da tensão confinante não apresentaram variação da resistência máxima conforme era aumentada a tensão confinante, mostrando comportamento diferente do esperado, ilustrado na Figura 3 a seguir.

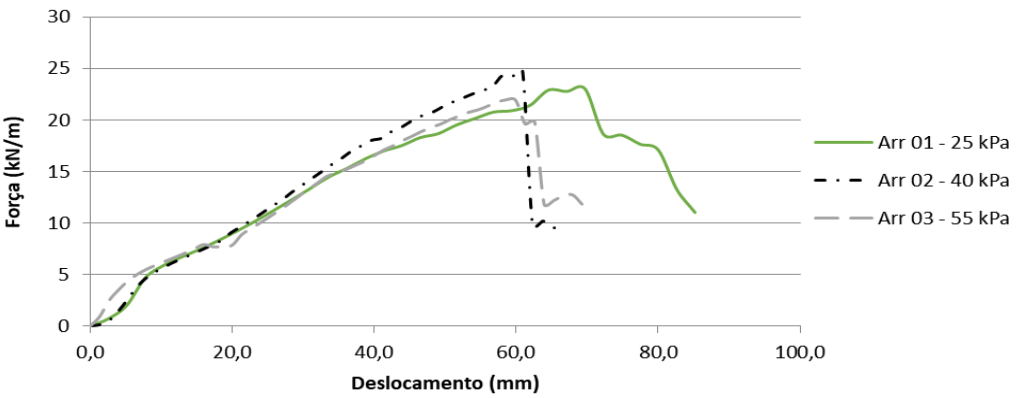


Figura 3. Curvas força de arrancamento versus deslocamento da garra em brita.

Devido à incoerência dos valores obtidos, a envoltória de arrancamento considerada foi uma reta horizontal no valor médio das forças máximas de arrancamento obtidas.

Os ensaios de arrancamento geraram deslocamentos ao longo do reforço conforme era aumentada a carga de arrancamento, como pode ser observado na Figura 4 a seguir.

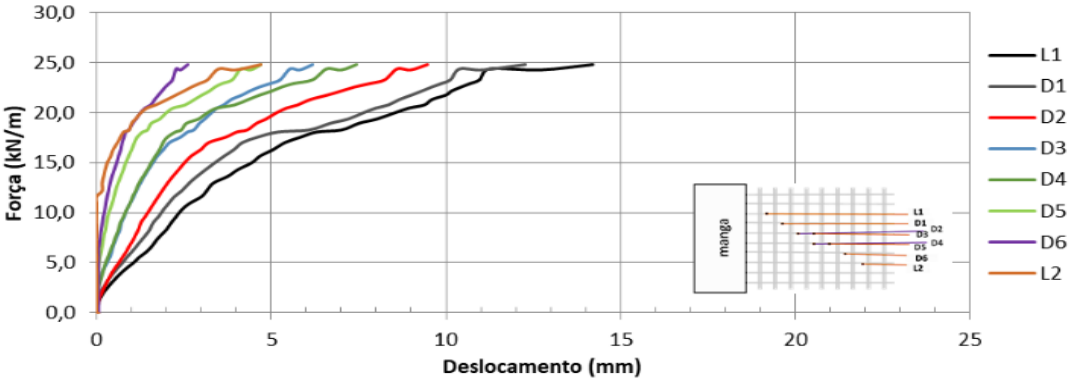


Figura 4. Deslocamento dos sensores ao longo da amostra durante arrancamento com tensão, σ, de 40 kPa em brita.

Pode-se perceber que os deslocamentos são maiores na parte próxima à garra e tendem a diminuir gradualmente com o afastamento em relação à fonte tensionadora, como era esperado, mostrando que o reforço

é solicitado em ao longo do seu comprimento ancorado conforme a carga é aumenta, solicitando um comprimento maior da geogrelha.

Este comportamento pode ser mais bem visualizado na Figura 5 a seguir.

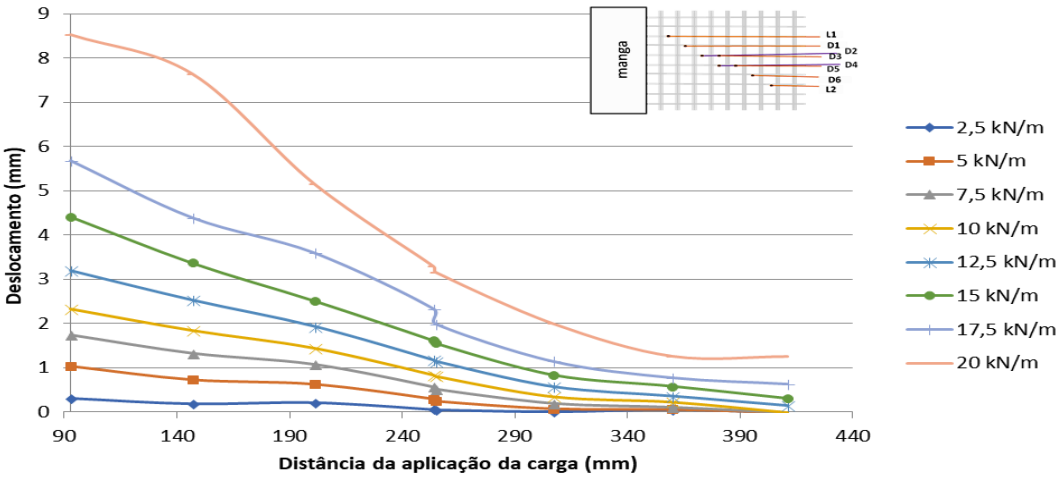


Figura 5. Solicitações ao longo do corpo de prova em ensaio de arrancamento com tensão, σ, de 40 kPa em brita..

A partir desta forma de análise pode-se notar que uma carga de 2,5kN/m mobiliza cerca de 250mm do reforço, o aumento da carga para 5,0kN/m solicita cerca de 310mm, para 10kN/m são solicitados 400mm e a partir deste carregamento o reforço é integralmente mobilizado e tem seus deslocamentos aumentados, sempre de maneira mais expressiva na parte próxima à garra de tração.

Em relação à variação de tensões registrada pelos sensores “H” e “V”, os valores registrados pelo sensor diretamente à frente da manga (H1) apontaram valores iniciais maiores na ordem de 4 vezes os valores registrados mais longe da manga, concluindo que a manga interfere na distribuição das tensões na caixa, principalmente próximo à geogrelha.

Ao início do arrancamento a célula horizontal mais próxima à frente do reforço (na entrada da manga) H1 sofre redução das tensões em cerca de 33%, devido ao desconfinamento e movimentação do material granular neste local. Quase em seguida ocorre uma redução das tensões da segunda e terceira células (H2 e H3) da ordem de 2%, mostrando que a perturbação do solo ocorre de modo muito mais pronunciado próximo à entrada da manga, em cerca de 100mm e já se estabiliza a 200mm de distância desta. Após aqueda de tensão confinante se inicia gradualmente o aumento desta, alcançando níveis cerca de 40% maiores do que os valores iniciais.

Já em relação às células verticais, o início do ensaio não se caracteriza pela diminuição das tensões, mas sim pelo aumento gradual destas, da ordem de 400% no sensor mais próximo à geogrelha (V1), e da ordem de 40% nos sensores V2 e V3, mostrando que ocorre perturbação acentuada em cerca de 50mm da geogrelha e a partir de 100mm a perturbação já se estabiliza.

3.2 Arrancamento cíclico

Os ensaios cíclicos foram baseados na envoltória (reta horizontal) considerada a partir dos ensaios de arrancamento, onde o reforço era solicitado ciclicamente com 20, 40 e 60% em relação à envoltória de arrancamento considerada.

Ao longo do tempo foram registrados os deslocamentos na amostra, e foram selecionados um sensor próximo à parte frontal (próxima à aplicação de carga) e outro próximo ao final do reforço (parte mais embutida), com a finalidade de representar os deslocamentos médios na parte frontal e traseira da amostra, que quando combinados com a carga aplicada, também ao longo do tempo geraram o gráfico da Figura 6 a seguir.

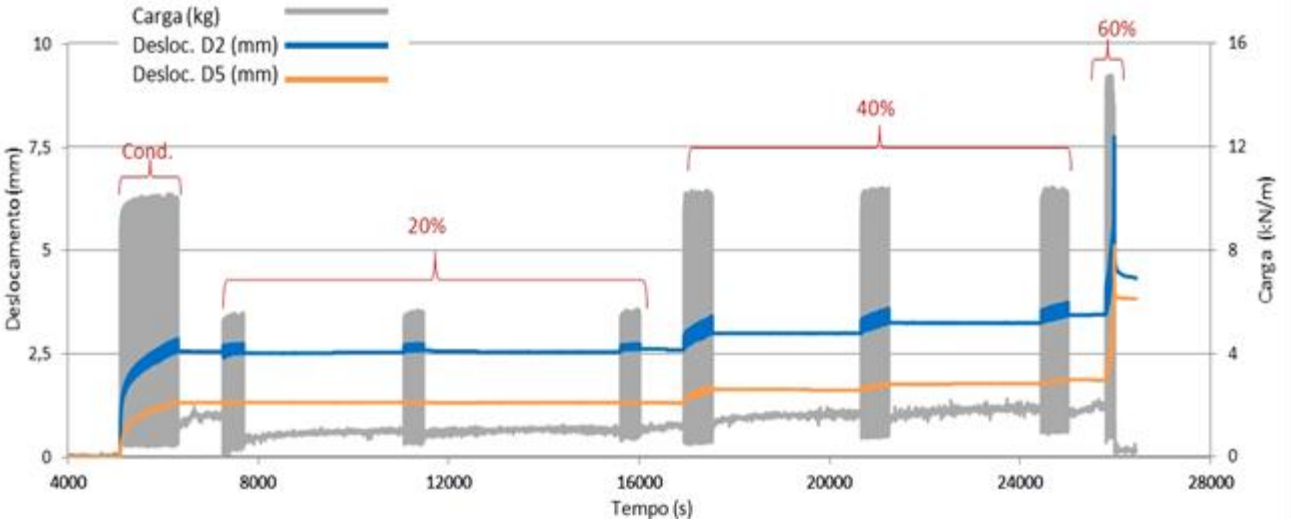


Figura 6. Níveis de carregamento e deslocamento da amostra em brita.

No gráfico pode-se notar que na ciclagem inicial de condicionamento (40% da carga máxima e 40kPa de confinante) ocorrem grande parte dos deslocamentos registrados na amostra.

Logo em seguida a confinante é diminuída e a carga vai a 20% da carga de arrancamento. Nesta série de ciclagem ocorre relativamente pouco acúmulo de deformações, e estes mostraram tendência de estabilização após cerca de 30% dos ciclos desta sequência. Com o aumento da carga para 40% da de arrancamento o acúmulo de deslocamentos se mostra aumentando constantemente, com um aumento relativamente menor a cada ciclagem, com comportamento semelhante à "continuidade" do gerado na etapa de condicionamento, já sem tendência à estabilização, mas sim a uma atenuação do acréscimo das deformações ao longo dos ciclos. Quando o carregamento sobe a 60% da carga máxima de arrancamento os deslocamentos registrados em ambos os sensores são extremamente pronunciados desde o início da ciclagem e logo o reforço se rompeu.

3.3 Módulo de resiliência

O parâmetro utilizado nos cálculos mecanísticos de fundações de vias é o módulo de resiliência de cisalhamento de interface (G_i). Este valor é obtido através do deslocamento elástico médio entre a parte frontal e traseira da amostra no decorrer do ciclo de carregamento e descarregamento, gerando sequências de curvas semielípticas como a apresentada na Figura 7 a seguir, referente aos 300 ciclos da ciclagem com 40% da Fmáx e Tensão de 40kPa.

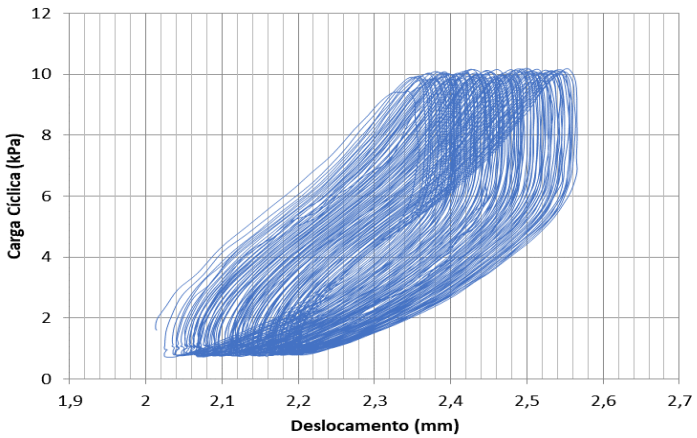


Figura 7. Ciclagem completa a 40 % da Fmáx e tensão, σ, de 40 kPa em brita.

Nesta sequência pode-se perceber que não há tendência de estabilização e o aumento de deslocamento médio acumulado ocorre a cada ciclagem.

Segundo a norma ASTM D 7499-09, deve-se utilizar os dez últimos ciclos de cada sequência para realizar os tratamentos e se obter o módulo de cisalhamento de interface. Tais tratamentos foram realizados e foram obtidos os módulos de G_i para cada tensão cisalhante, gerando a Figura 8 a seguir.

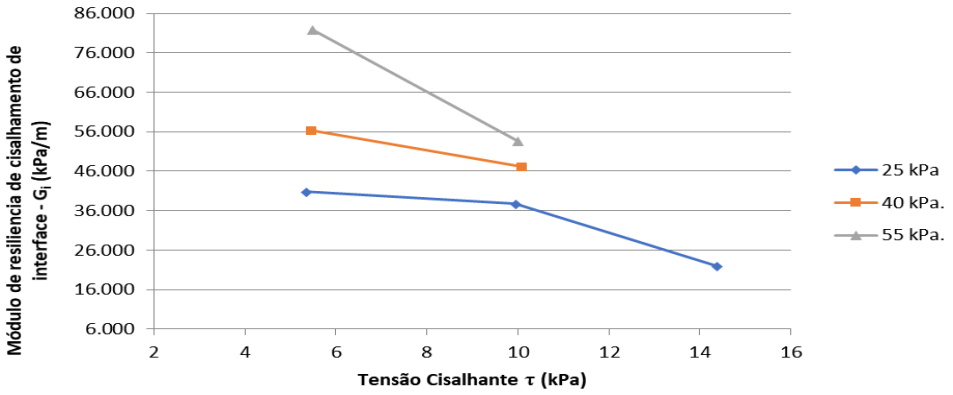


Figura 8. Modulo de resiliência (G_i) de interface versus tensão cisalhante (τ) na brita.

Os módulos obtidos nestes ensaios foram de cerca de metade da magnitude dos valores encontrados nas referências técnicas da área.

Acredita-se que tal fato ocorreu devido à maior deformabilidade do reforço utilizado nesta pesquisa, devido ao seu polímero base (PET) e aos maiores níveis de cargas aplicadas, possíveis graças ao maior comprimento embutido do reforço, gerando um comportamento distinto do esperado, fazendo com que o reforço se rompesse pouco após o início da quarta parte do ensaio.

3.4 Exumação do corpo de prova

Após a ruptura do corpo de prova foi realizado um desmonte cauteloso da caixa de ensaios até o nível da amostra com o intuito de verificar os motivos da ruptura desta.

Pôde-se observar que a ruptura foi causada pela abrasão dos elementos longitudinais (Figura 9 a seguir) com os grãos maiores de brita que ficaram próximos à entrada da manga (que existia para evitar que o reforço sofresse a influência da parede frontal da caixa) que era o local onde a amostra mais se deslocava durante a ciclagem devido à maior proximidade com a fonte de carregamento, conforme foi mostrado na Figura 5 anterior.

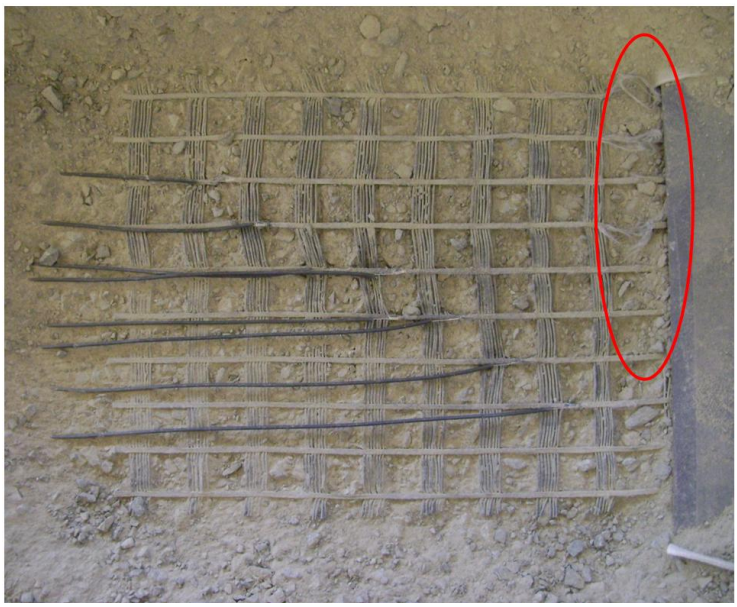


Figura 9. Reforço cisalhado em brita.

4 CONCLUSÕES

Os ensaios de arrancamento não mostraram que o aumento da tensão confinante, nos níveis realizados nesta pesquisa resultaram em aumento da resistência ao arrancamento, porém, mostraram um comportamento de solicitação gradual do corpo de prova conforme era aumentado o carregamento, como esperado, e mostraram que as maiores perturbações no solo ocorrem próximo à abertura da manga, e mostraram que as dimensões da caixa são suficientes para não haver interferência das paredes da caixa nos ensaios.

Em relação aos ensaios cíclicos, os maiores níveis de deslocamentos foram obtidos na etapa de condicionamento, se mantiveram no carregamento de 20% e aumentaram constantemente durante o carregamento de 40%. Já no início da ciclagem de 60% o corpo de prova rompeu devido à abrasão com os grãos maiores com a "entrada" da geogrelha na caixa (manga), que era onde havia os maiores deslocamentos relativos entre o solo e o reforço.

Em relação ao valor dos módulos G_i obtidos, de cerca de metade do relatado na literatura, acredita-se que a diferença seja devido à deformabilidade maior do polímero base do reforço e devido ao maior comprimento do corpo de prova utilizado, que gerava uma maior carga de arrancamento e assim uma magnitude maior de carregamentos cíclicos gerados nesta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

Campos, M.V.W. de; Vilar, O.M. (2016) Comportamento de Geogrelha Instalada em Solo de Baixa Resistência e Submetida ao Arrancamento Cíclico. XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - COBRAMSEG, Belo Horizonte, MG, Brasil, 8 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.

DNIT-ME 134 (2010) – Pavimentação - Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio, 11p.

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.