RESISTENCIA E DILATÂNCIA DE INTERFACE AREIA-GEOGRELHA EXTRUDADA COM USO DE EQUIPAMENTO DE PEQUENO PORTE.

RODRIGUEZ, Maria Gabriela Guevara(1), PORTELINHA, Fernando Henrique (2)

(1) Estudante de Mestrado em Estrutura e Construção Civil, Universidade Federal de São Carlos, maria.gabriela.guevara@hotmail.es. (2) Coordenador LabGEO/UFSCar e Orientador do Programa de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de São Carlos fportelinha@gmail.com

Resumo: *Estruturas de solo reforçado com geossintético são corriqueiramente executadas com solos granulares. No entanto, estes podem sofrer de compressão ou dilatação a depender da condição de compacidade relativa. Em estruturas de solo reforçado, a resistência de interface solo-geossintético, normalmente obtida por ensaios de arrancamento ou cisalhamento direto, consiste num parâmetro imprescindível para análises de projeto. Em caso de ensaios em solo arenosos, o fenômeno da dilatância pode ser impedida nos ensaios de arrancamento, devido à restrição do sistema de reação, o que pode provocar um incremento de tensão normal que pode afetar a resistência ao arrancamento. Este artigo baseia-se em ensaios de arrancamento realizados com uma geogrelha extrudada, a qual foi embutida em uma areia bem graduada com diferentes valores de compacidade relativa. Foram avaliados a dilatação da interface e a resistência máxima de arrancamento da geogrelha, utilizando um equipamento de escala reduzida. A força de arrancamento será aplicada por uma máquina de ensaios de cisalhamento direito modificada, com instrumentação que permita registrar a força de arrancamento máxima suportada e o deslocamento do geossintéticos em relação ao tipo de solo utilizado. Os resultados mostraram que a dilatação em interfaces solo-geogrelha são significantes e, muitas vezes, maiores que a do próprio solo. Os geotêxteis tecidos mostraram, por outro lado, dilatação pouco significativa.*

Palavras-chave: *Geossintéticos, resistência ao arrancamento, pequeno porte, solo reforçado, deslocamento, dilatação.*

Área do Conhecimento: *Tecnologia de processos e sistemas construtivos*

1 INTRODUÇÃO

A interação entre solo e geossintético é de suma importância para o projeto e desempenho de estruturas de solo reforçado. Esse mecanismo de interação depende das propriedades e características do solo e da relação entre os materiais usados. É importante reconhecer que os solos arenosos podem sofrer variações de volume tanto de compressão como de dilatação, dependendo da condição de compacidade relativa em que se encontram. Ainda, o efeito de dilatação é típico no comportamento das areias densas, já que, ocorre uma expansão inicial no volume da amostra de solo utilizada nos ensaios de cisalhamento direto, seguida por uma contração devido à aplicação da tensão confinante, até chegar a um volume de solo constante quando a tensão de cisalhamento residual é atingida (Infante et al. 2016). A expansão inicial no volume das areias ocorre porque as partículas estão interligadas entre si, e quando a força de cisalhamento é aplicada, um rearranjo ocorre entre as partículas e o volume aumenta. Depois de atingir o pico de tensão de cisalhamento, as partículas rearranjadas experimentam uma diminuição no volume e o volume final da amostra fica constante. No entanto, nos ensaios de arrancamento ocorre algo diferente. O fenômeno de dilatância é impedida, já que provoca um aumento da tensão normal no nível da interface solo-geogrelha, o que provoca um aumento da resistência ao arrancamento. Segundo Chang et al. (1995), os fatores de capacidade de carga crescem com o aumento do ângulo de atrito interno do solo e o ângulo de atrito da interface solo-geogrelha, consequentemente, a resistência ao arrancamento também cresce. Muitas vezes foram encontradas discrepâncias nos ensaios de arrancamento feitos com tipos de solo diferentes, essas discrepâncias se devem principalmente ao tamanho dos grãos que preenchem os vazios da geogrelha, isso porque o solo com menor tamanho médio de partícula e maior

quantidade de finos fornece maiores taxas de crescimento e os fatores de capacidade de carga estão intimamente relacionados com a resistência ao arrancamento e ao comportamento friccional dos solos reforçados.

Segundo Teixeira (2003), os solos granulares bem graduados oferecem, ainda, uma resistência maior que os solos mal graduados, pois além dos solos bem graduados apresentarem uma melhor homogeneidade entre os seus grãos, os grãos maiores deslizam com maior dificuldade quando são empurrados pelos elementos transversais. Por em quanto, os grãos maiores movimentam-se de encontro aos grãos menores, formando progressivamente uma massa firme de solo e frente aos elementos transversais, o que promove uma maior resistência passiva e, por consequência, uma maior resistência ao arrancamento.

Este trabalho consiste, portanto, na avaliação da dilatância de interfaces areia-geogrelhas durante ensaios de arrancamento realizados com aparatos de pequeno porte. Ainda, esse comportamento será confrontado com os resultados de resistência máxima de arrancamento e deslocamentos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Geossintéticos como reforço

O termo Geossintético deriva da combinação das palavras “geo”, que significa terra e “sintéticos” referindo-se com a matéria prima com que são fabricados. Este tipo de material sintético é um dos mais utilizados em obras de geotecnia, porque permite a elaboração de projetos criativos, de alta durabilidade e baixo custo sendo combinados ou associado com o solo. Kakuda (2005).

Vale salientar que os parâmetros mais importantes dos geossintético são investigados há anos na literatura por meio de ensaios de arrancamento no estudo dos mecanismos de interação solo-reforço, alguns autores que podem ser mencionados: Brand e Duffy (1987), Farrag (1993), Bauer (1993), Alfaro, et al (1995), Ochiai (1996), Castro (1999), Teixeira e Bueno (1999), Sieira e Sayão (2002), Sieira (2003), Teixeira (2003), Kakuda (2005). Além da rigidez do geossintético para pequenas deformações, propriedades como o módulo de estabilidade da abertura de malha de geogrelhas, espessura dos elementos, formato da seção transversal dos elementos da geogrelha, resistência de junta e dimensões da abertura de malha têm influência no desempenho do geossintético como reforço de base. Webster (1993); Collin et al. (1996).

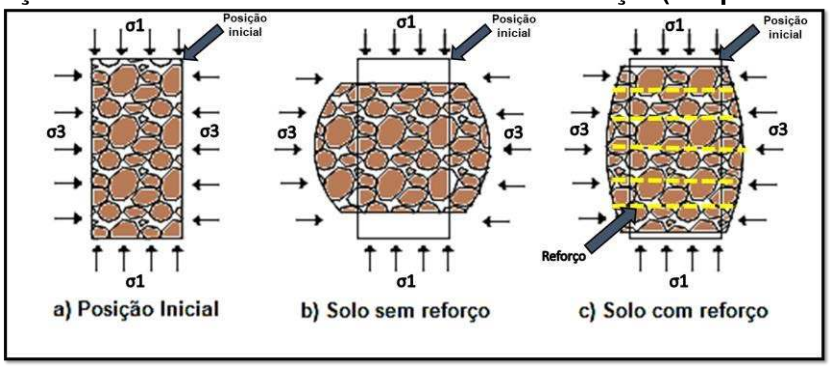
2.2 Solo Reforçado

Os métodos de melhoria de solos com vista à estabilização e contenção de taludes têm sido objeto de muitas pesquisas nos últimos anos, visto que os deslizamentos de terra ocasionam gastos anuais volumosos em obras de prevenção e correção, além das despesas indiretas provenientes dos acidentes que frequentemente ocorrem nos períodos chuvosos. As estruturas de solo reforçado são uma alternativa para soluções de muro de gravidade e de flexão, e são utilizadas cada vez mais para duas finalidades importantes: Taludes em aterro e aterros de base para obras de infraestrutura. O processo consiste basicamente em introduzir no maciço de solo, elementos que possuam resistência à tração relativamente elevada como por exemplo fitas metálicas, mantas de geotêxteis, geogrelha, malhas de aço, etc.

As estruturas de solo reforçado são basicamente diferentes das estruturas de contenção convencionais que são estabilizadas externamente (gabiões, muros de concreto, etc). Os sistemas de estabilização externa utilizam uma parede estrutural contra a qual são mobilizadas as forças de estabilização. Entretanto os sistemas de estabilização interna envolvem os reforços instalados dentro da massa de solo e são estendidos além da superfície potencial de ruptura. (Texeira, 2003).

O princípio básico do funcionamento de um elemento de solo reforçado é apresentado na **Figura 1**. Os sistemas de estabilização interna possuem predominantemente elementos horizontais de reforço, como tiras metálicas ou geogrelhas

Figura 1. Deformações em um elemento de solo com e sem reforço. (Adaptado de Benjamin 2006).



Se os esforços de compressão sobre o elemento de solo sem reforço, aumentarem progressivamente, ocorrerá a ruptura do elemento por cisalhamento. Nesse caso, surgirá uma cunha de ruptura no elemento, que poderá ser interceptada pelo reforço. O reforço trabalhará no sentido de evitar que a superfície de ruptura se desenvolva no solo.

2.3 Mecanismos de Interação solo – reforço

O mecanismo de interação entre solo e geossintéticos na resistência ao arrancamento deve-se ao atrito que se desenvolve no contato entre os dois materiais. Por exemplo, os geotêxteis são mantas planas e contínuas, que separam a massa de solo em camadas horizontais, mobilizando o mecanismo de cisalhamento na interface com o solo em contato. Por outro lado, as geogrelhas, são mantas vazadas, com orifícios que permitem a continuidade do solo do aterro, a interação entre o solo e a geogrelha é em função de dois mecanismos distintos: 1) cisalhamento na interface; 2) cisalhamento do solo nos orifícios da malha. Fontenla (2003).

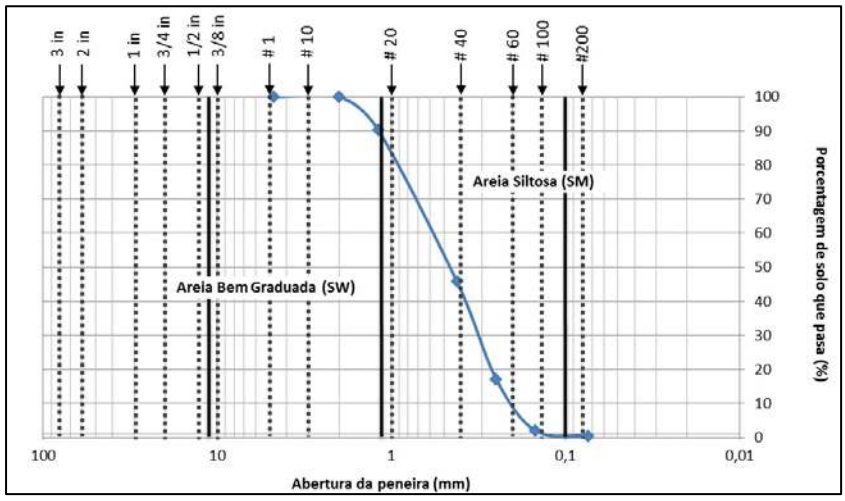
3 METODOLOGÍA

3.1 Materiais

3.1.1 Solo

Para esse estudo foi utilizada uma areia graduada (SW) cujos resultados são mostrados na **Figura 2**. Para determinação da compacidade relativa foi feito os ensaio de vazios máximo e mínimo, bem como de massa específica dos sólidos.

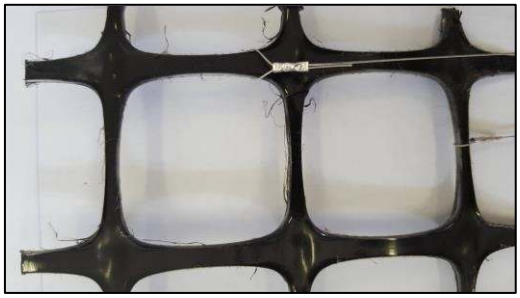
Figura 2. Resultados dos ensaios de peneiramento fino para areia



3.1.2 Tipos de Geossintéticos

Foram utilizados dois tipos de geossintéticos no programa experimental: uma geogrelha extrudada biaxial de polietileno de alta densidade (PEAD) e uma geogrelha tecida uniaxial de poliéster (PET). A **Figura 3** mostra o geossintético utilizados como reforço neste estudo.

Figura 3. Geossintético utilizado no ensaio. Geogrelha extrudada biaxial.



3.2 Desenvolvimento do equipamento de pequeno porte

A aparelhagem utilizada para a execução do ensaio de arrancamento é resumido em: uma caixa de testes de interfaces, um mecanismo que aplica a força de arrancamento, um sistema que permita regular a tensão de confinamento do solo e um sistema de sensores capazes de monitorar as respostas do ensaio. A caixa utilizada e uma adaptação do aparelho de cisalhamento direto de pequeno porte existente no Laboratório de Geotecnia da Universidade Federal de São Carlos (LabGEO/UFSCar), foram feitas algumas alterações em suas dimensões, conforme ilustra a **Figura 4**. As dimensões internas da caixa são 185 mm de comprimento, 155 mm de largura e 140 mm de altura, obtendo um volume aproximado de 0,0040m3.

Figura 4. Equipamento de cisalhamento direto modificado



Fixou-se a caixa em um sistema utilizado para ensaios de cisalhamento direto. Nesta montagem, a sobrecarga aplicada (tensão confinante) é resultado da adição de pesos em um sistema de alavancas, onde o momento resultante é transferido ao solo através do encaixe superior do arranjo em uma esfera de aço, a fim de distribuir igualmente as tensões provenientes para um tronco de pirâmide quadrado apoiado sobre o solo compactado, analogamente á ação de uma sapata. Através do equacionamento adequado, é possível determinar a carga atuante no solo a ser ensaiado. Sobre a mesa do equipamento, também se encontra um sistema para aplicação da força horizontal na caixa de ensaios, constituído de um motor com 9 níveis de velocidade, um cabo de metal que se desloca a uma velocidade constante, uma coroa circular flexível e um botão de acionamento com duas funções: progressiva e retrógrada. Neste sistema acoplou-se uma “garra” no pistão metálico, juntamente com suporte horizontal para possibilitar o arrancamento do geossintético do sistema

de confinamento em solos. Embora o motor existente apresente 9 níveis de velocidades de modo que será tomado em consideração uma velocidade de deslocamento da garra de 2,0 mm/min.

3.3 Detalhamento da instrumentação utilizada

Para a avaliação da intensidade da força de arrancamento, o anel dinanométrico do ensaio de cisalhamento direto deve ser substituído com uma célula de carga tipo "S" para medidas automatizadas de cargas de tração. O monitoramento da tensão no centro e na parede da caixa foi realizado por meio da utilização de duas células de tensões com capacidade total de 200 kPa e 500 kPa, de mesmo diâmetro cada uma (30 mm).

Os deslocamentos verticais foram monitorados utilizando um transdutor digital de deslocamento (LVDT) e os deslocamentos horizontais internos dos geossintéticos foram medidos ao longo dos ensaios com o uso do sistema "tell-tales" que consiste na fixação de uma extremidade de fios inextensíveis em diferentes pontos ao longo da mostra de geossintético e, a outra extremidade ligada aos transdutores de deslocamento potencio métricos LXPA.

3.4 Procedimento do ensaio de arrancamento

Primeiramente o solo é compactado com o grau de compactação adequado na caixa de ensaios, adotando-se quatro camadas de compactação de 35 mm correspondentes respectivamente a metade e bordo de cada parte da caixa, a um volume aproximado de 1000 cm3 por camada. A compactação é realizada com um soquete manual de madeira e as camadas pós-compactação são escarificadas para recebimento de uma nova camada a compactar.

Depois, se cortam as mostras de geossintéticos com a largura padrão de 100 mm e comprimento variado para realizar diferentes testes. No término da segunda camada de compactação é inserida a amostra do geossintético, de modo que fique entre a segunda e terceira camada compactada (na abertura da caixa inferior). Em seguida são colocados os fios inextensíveis em diferentes pontos ao longo da mostra de geogrelha e, a outra extremidade é ligada aos transdutores de deslocamento potenciométricos (LXPA).

É importante mencionar que são usadas folhas lisas e plásticas intercaladas com lubrificante nas paredes da caixa para mitigar o efeito de atrito nas paredes internas da caixa no momento da realização do ensaio.

Após a inserção da quarta camada de solo, o procedimento de compactação deve ser realizado de forma que a camada acabada fique a cerca de 2,0 mm abaixo da borda superior da caixa, para acomodação ótima da chapa metálica, garantindo maior homogeneidade na aplicação da sobrecarga. Por fim, o cabeçote é então colocado sobre a caixa, o conjunto fixado no mecanismo de aplicação da força de arrancamento, o sistema de sobrecarga é iniciado resultando no valor determinado de pressão atuante e então o geossintético é preso a garra de ensaio e puxado pelo motor em modo retrocesso.

Para a coleta de dados são usados dois diferentes softwares, um deles é o MICRO MEASUREMENTS que permite salvar por cada segundo a força de arrancamento horizontal da garra, a tensão vertical aplicada sobre a geogrelha, a tensão na parede e o deslocamento vertical registrado pelo LVDT. O outro software utilizado é o LAB VIEW 2013 da Nacional Instruments® que registra os dados obtidos de deslocamento horizontal dos LXPAs fixados ao geossintético.

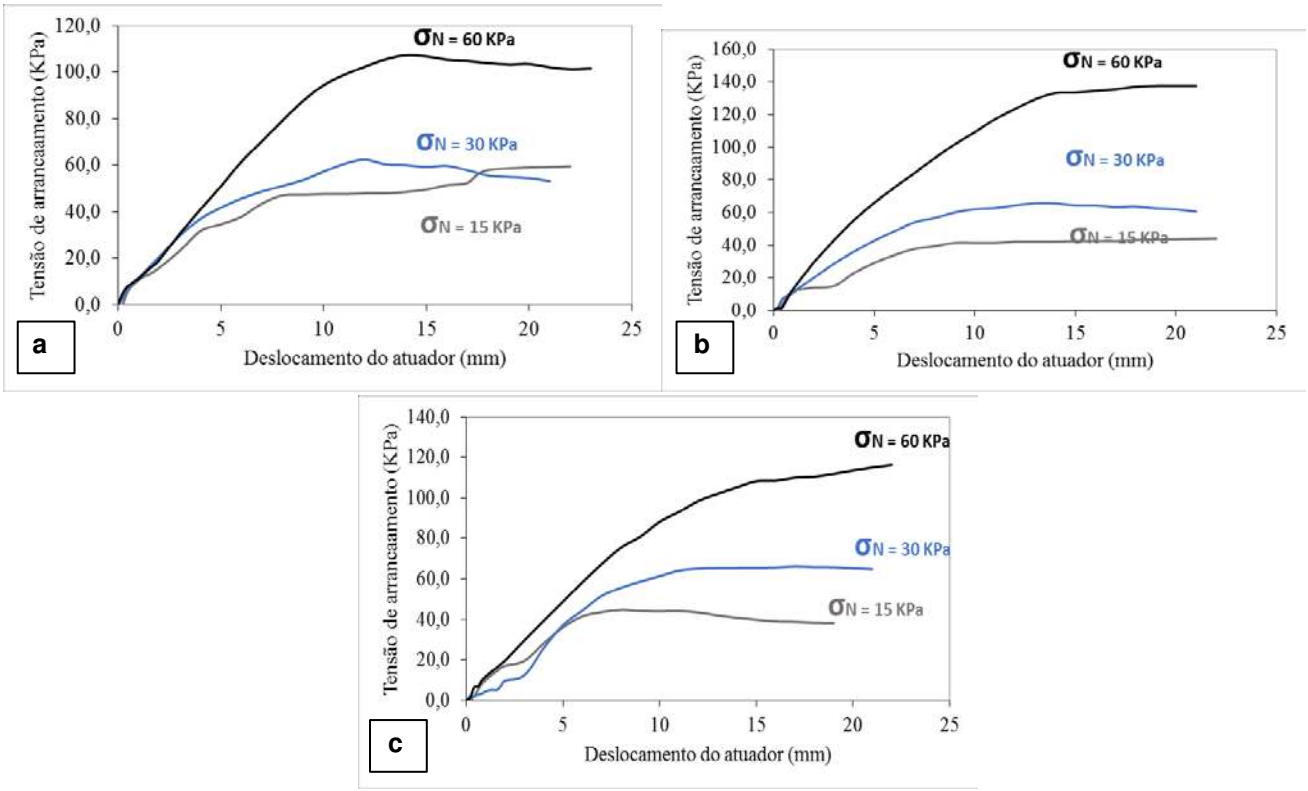
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resistencia máxima ao arrancamento em Geogrelha extrudada biaxial

Nas **Figuras 5a, 5b e 5c** são apresentados os resultados de ensaios de arrancamento de geogrelha extrudada biaxial, feitos com areia em diferentes índices de vazios. Pode-se observar as forças e tensões de arrancamento versus os deslocamentos horizontais do atuador, executados com geogrelha extrudada biaxial, estes resultados são apresentados em função das cargas confinantes aplicadas (15KPa, 30KPa e 60 KPa). Assim como para a geogrelha tecida, as tensões de arrancamento são proporcionais ao aumento da tensão confinante, o que era esperado. Em comparação com os resultados de tensão de arrancamento da geogrelha tecida, as tensões de arrancamento da geogrelha extrudada foram significativamente superiores. Ainda, nota-se que o índice de vazios pouco altera as resistência ao arrancamento dessa geogrelha. Observa-se também que o

comportamento e a interação da interface solo-geossintéticos dessa geogrelha é muito diferente em comparação à geogrelha tecida devido a que a geogrelha extrudada possui maior grau de rigidez o que significa que o deslocamento do reforço é menor e os resultados são mais constantes e precisos.

Figura 5. Resultados de ensaios de arrancamento de geogrelha extrudada em areia: (a) índice de vazios mínimo; (b) índice de vazios médio; (c) índice de vazios máximo.

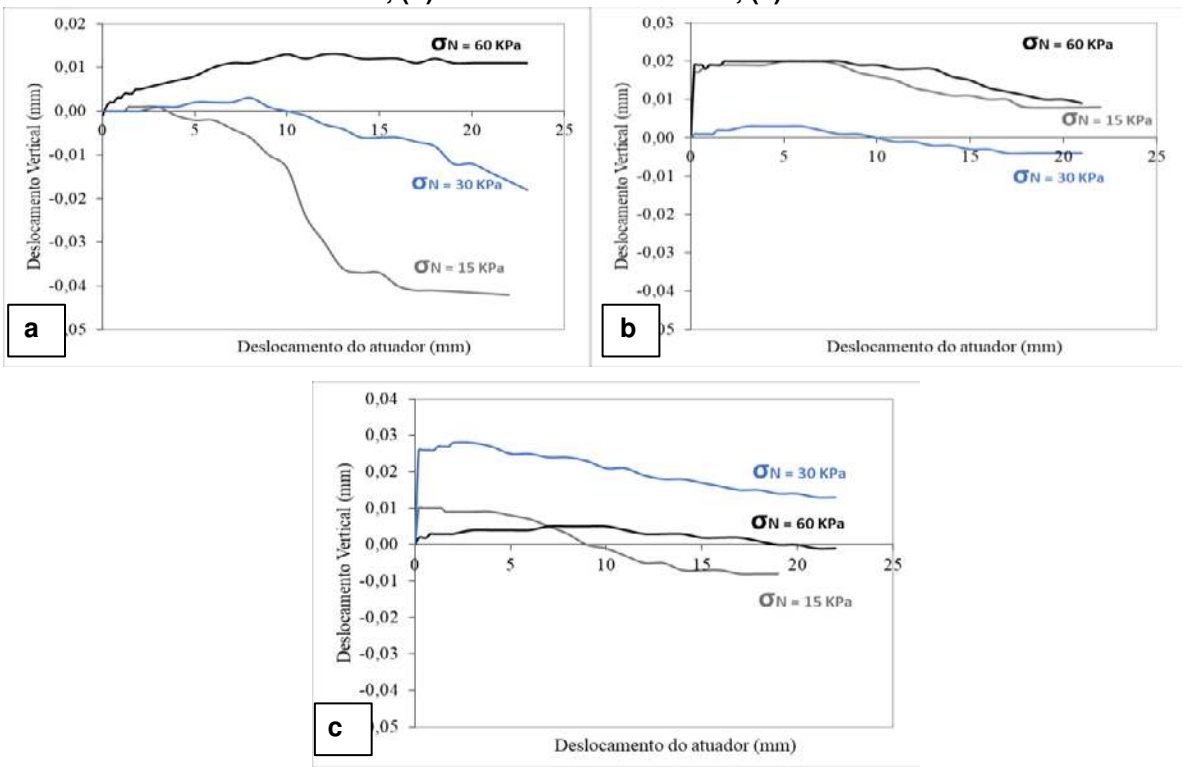


Observa-se também nestes ensaios de arrancamento, que um dos fatores principais que afeta o comportamento da interface são as propriedades mecânicas do solo e o outro fator é a rigidez do reforço usado, é muito importante que o geossintético apresente rigidez considerável, como neste caso, porque se há uma falta de resistência atritiva e/ou adesiva na interface, as tensões podem não ser mobilizadas, então a mobilização das tensões no reforço, depende principalmente da interação solo-reforço e da compatibilidade de deformações e rigidez de ambos materiais. Podemos deduzir que a geometria da geogrelha extrudada biaxial conciliada com sua rigidez elevada, contribui para aumentar a resistência da interface. A presença de interface solo-solo entre a abertura (maior neste caso) contribui para a resistência atritiva desta região, além de fornecer uma melhor ancoragem para o geossintético.

4.2 Dilatação da interface Solo-Geogrelha extrudada biaxial

A **Figura 6** mostra os resultados de deslocoamento vertical medidos durante os ensaios de arracamento. A compacidade relativa impõe um significativo efeito na dilatação da interface. Na Figura 6a, o índice de vazios mínimos da areia é avaliado, há um comportamento de expansão (curva negativas) para menores tensões de confinamento. Esse comportamento provoca um aumento de volume do solo e restringe ao mesmo tempo o incremento da tensão normal. Nos resultados da Figura 6b e 6c se mostra-se que o aumento do índice de vazios favorece ao comportamento de compressão, principalmente para menores valores de tensões de confinamento.

Figura 6. Resultados de deslocamento vertical medidos durante os ensaios de arrancamento: (a) índice de vazios mínimo; (b) índice de vazios médio; (c) índice de vazios máximo.

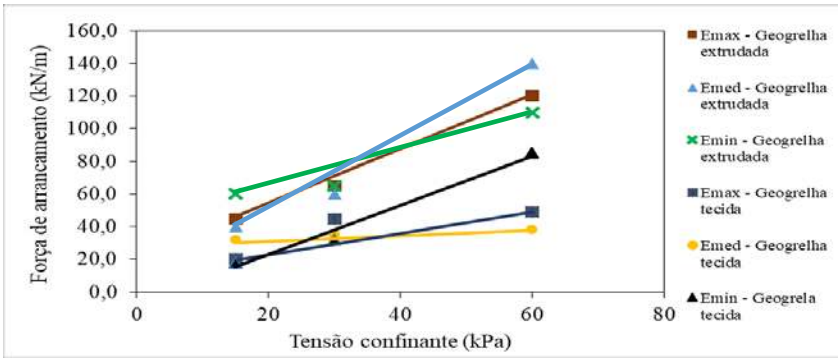


4.3 Envoltória de resistência de interface areia-geogrelhas

Para determinar as envoltórias de resistência das interfaces solo - geogrelha foi assumido o critério de ruptura de Mohr-Coulomb, o qual é necessário para qualquer projeto ou ensaio geotécnico, envolvendo além disso o fenômeno de cisalhamento que no caso de solos não coesivos, o ângulo de atrito interno (φ') é o principal parâmetro de resistência. Na **Figura 7** são comparadas as envoltórias de resistência das interfaces obtidas neste estudo, o que indicam os gráficos, é que o solo granular que apresenta maior inclinação é o que possui maior ângulo de atrito e assim mesmo a maior resistência, devido a seu alto grau de frações arenosas.

A ocorrência de movimentos relativos entre o solo usado e o geossintético, provoca mobilizações de forças de atrito e/ou adesão na interface, ao mesmo tempo que também provoca confinamento. Para este tipo de solo foi determinado um ângulo de atrito bem elevado e um intercepto coesivo das envoltórias bem alto também, o que confere ao solo uma maior resistência e capacidade de suporte no momento de resistir as tensões aplicadas.

Figura 7. Envoltórias de resistência calculadas segundo o critério de ruptura Mohr-Coulomb



5 CONCLUSOES

De acordo com os resultados obtidos durante a realização destos ensaios, pode-se concluir que o equipamento utilizado para a execução dos ensaios funcionou adequadamente para o propósito da pesquisa.

O que se refere ao comportamento de variação volumétrica do solo, este não se mostrou tão constante ao ser submetido a tensões confinantes e forças de arrancamento, a condição de indice de vazios máximo favoreceu a compressão do solo e foi principalmente para os valores menores de tensão de confinamento. Com respeito ao fenómeno da dilatância esse ocorreu maiormente nos ensaios feitos com indice de vazios mínimo e combinado com os valores menores de tensões confinantes. No entanto, o sistema capturou de forma adequada o comportamento de dilatação da interface e demostrou que a dilatação destas interfaces são significantes e, muitas vezes, maiores que a do próprio solo.

Em relação à envoltoria de resistência obtida esta apresentou valores coerentes nos ensaios, o que permitiu verificar o desenvolvimento da geogrelha extrudada que foi muito maior combinada com solo com indice de vazios medio, para indice de vazios medio a resistência ao arrancamento máxima aconteceu com uma tensão de arrancamento de 140 KPa, para indice máximo foi de 120 KPa e para indice mínimo foi de 100 KPa. Por isso, se confirma que a resistencia ao arrancamento desenvolvida neste tipo de interface solo-geogrelha supera à mesma resistencia do solo. Também a rigidez da geogrelha usada, determinó um melhor desempenho da resistencia da interface devido a seu alto grau de resistência e menor deformação na hora dos ensaios, em comparação da geogrelha tecida

6 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

BENJAMIN, C. V. (2006). Avaliação experimental de protótipos de estruturas de contenção em solo reforçado com geotêxtil. 326p. Tese Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos,
2005.

CASAGRANDE, M. D. T., Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações, Tese de Doutorado, PPGEC/UFRGS, Porto Alegre/RS, 2005.

CHANG, D.T., SUN, T.S & HUNG, F. (1995), “Pullout Mechanism of Geogrids Under Confinement by Sandy and

Clayey Soils”. Transportation Research Record No. 1474, pp. 64-72.

FONTENLA, Sieira Ana Cristina. Geossintéticos e Obras de Terra. Departamento de Estruturas e Fundações, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ. LPS Engenharia e Consultoria Ltda.

JEWELL RA, Wroth CP (1987) Direct shear tests and reinforced sand. Géotech 37(1):53–68

KAKUDA, Francis Massashi. Estudo de ensaios de arrancamento de geogrelha com utilização de um equipamento reduzido. 2005, 145 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

TEXEIRA, S. H. C. (2003), “Estudo da interação solo-geogrelha em testes de arrancamento e a sua aplicação na análise e dimensionamento de maciços reforçados”, Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 218p.

PORTELINHA, Fernando Henrique Martins. Comparação entre estruturas de solo reforçado com geotêxteis tecidos e não tecidos: caso de obra em Campinas – SP. Fundações & Obras Geotécnicas, São Paulo, v. 42, p 52 –59. 2014.