UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Ilha Solteira

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

"Equipamento para realização de ensaios de tração confinada e aquecida em geossintéticos"

BEATRIZ DE MELLO MASSIMINO

Orientador: Prof. Dr. José Augusto de Lollo
Co-orientador: Prof. Dr. Fagner Alexandre Nunes de França

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia - UNESP – Campus de Ilha Solteira, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Conhecimento: Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais.

Ilha Solteira – SP
Abril/2014

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

M417e

Massimino, Beatriz.
Equipamento para realização de ensaios de tração confinada e aquecida em geossintéticos / Beatriz Massimino. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2014
85 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais , 2014

Orientador: José Augusto de Lollo
Co-orientador: Fagner Alexandre Nunes de França
Inclui bibliografia

1. Geossintéticos. 2. Ensaio confinado-aquecido. 3. Rresistência a tração.

unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Equipamento para realização de ensaios de tração confinada e aquecida em geossintéticos

AUTORA: BEATRIZ DE MELLO MASSIMINO

ORIENTADOR: Prof. Dr. JOSE AUGUSTO DE LOLLO

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. FAGNER ALEXANDRE NUNES DE FRANÇA

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL , Área: RECURSOS HIDRICOS E TECNOLOGIAS AMBIENTAIS, pela Comissão Examinadora:

Fagner Alexandre N. de França.

Prof. Dr. FAGNER ALEXANDRE NUNES DE FRANÇA
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. ADRIANO SOUZA
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. FERNANDO HENRIQUE MARTINS PORTELINHA
Departamento de Engenharia Civil / Universidade Federal de São Carlos

Data da realização: 14 de abril de 2014.

AGRADECIMENTOS

A família,

Pelo apoio e incentivo a realização deste trabalho. Em especial aos meus pais Emilio e Wilma Massimino por todo o amor, carinho e dedicação a mim conferidos e ao meu irmão Daniel Massimino por ser um exemplo a se espelhar. Sem a presença destes em minha vida este trabalho não estaria completo.

Aos amigos,

Por toda ajuda empenhada. Em especial a João Rotta por auxiliar, orientar e buscar soluções para as dúvidas encontradas durante o caminho percorrido, com todo o carinho e paciência. À Mariana Feres, Deyse Sande e Lívia Massimino por me receberem com grande hospitalidade em sua casa durante o período de realização de ensaios. Ao casal João Domingos e Carolina Tosta que foram imprescindíveis na finalização deste projeto.

Aos orientadores,

Prof. Dr. José Augusto de Lollo e Prof. Dr. Fagner Alexandre Nunes de França que repassaram seus conhecimentos e ofereceram o apoio necessário para que esse trabalho fosse realizado, além da oportunidade concedida para realização desta pós-graduação em Engenharia Civil. Prof. Dr. Edson Tangerino pelo apoio e conhecimento concedido por toda estada na universidade. Prof. Dr. Adriano Souza por fornecer o aprendizado na área de geotecnia. Prof. Dr. Paulo Lodi por apresentar a área de geossintéticos, além de conceder uma melhor formação como cientista na área geotécnica. Prof. Dr. Jefferson Oliveira pela introdução na carreira científica. Prof. Dr. Orencio Vilar por fornecer o laboratório de geossintéticos, tanto para realização deste trabalho, quanto para o aperfeiçoamento na pesquisa dos geossintéticos.

Aos colegas,

Francisco Avesani, Jéssica Silva, Felipe Iceri, Jorge Vieira, Marcos Campos, Cléver Valentin, Walter Costa, Emanuel e Tiago pela ajuda na execução dos ensaios e aperfeiçoamento do equipamento utilizado.

As faculdades,

Júlio de Mesquita Filho – UNESP - Campus Ilha Solteira pelo ensino oferecido e a oportunidade de aperfeiçoar meus conhecimentos científicos na área de Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia de São Carlos – USP – pelo fornecimento de equipamento e laboratório para execução deste trabalho.

“But that was just a dream.” R.E.M.

RESUMO

Este trabalho adapta o equipamento que realiza ensaio de fluência confinada em conjunto com a elevação da temperatura para que ele possa realizar ensaios de resistência à tração nas mesmas condições (confinada-aquecida). O objetivo desta pesquisa visa à modificação do equipamento fazendo com que este possibilite a comparação do comportamento de resistência à tração do geossintético em variados formatos de ensaio e em diferentes configurações de amostras. O equipamento também traz a possibilidade de verificar como ocorre a deformação do material ao decorrer do carregamento. Os ensaios foram realizados em geogrelhas biaxiais e divididos em duas baterias: a primeira avaliou o comportamento do material em diferentes temperaturas de forma confinada e isolada; na segunda, os materiais foram testados de forma isolada e em temperatura ambiente (sem elevação da temperatura de ensaio no sistema). Os ensaios confinados resultaram em valores mais elevados de resistência à tração que os ensaios convencionais. Pode-se observar também que a temperatura não altera de forma significativa os resultados quando o material é exposto a ela durante um curto período de tempo. A variabilidade dos corpos de prova pouco influenciou nos resultados. Por outro lado, o comportamento da geogrelha se mostrou diferenciado quando observada áreas distintas do material através dos métodos de aquisição de dados utilizados.

Palavras-chave: Geossintéticos. Ensaio confinado-aquecido. Resistencia à tração.

ABSTRACT

This study adapting equipment that performs the confined creep tests simultaneously with the rise in temperature so that it can perform tensile strength tests under the same conditions (confined-heated). This research aims at the modification of the equipment causing it enables the comparison of geosynthetic tensile performance in various tests formats and in different settings samples. The device also brings the possibility of check how is the material strain during the loading. The tests were performed in biaxial geogrids and divided into two types of test: the first evaluated the performance of the material confined in different temperatures and isolation; in the second, the materials were tested in isolation and at room temperature (without elevation of the test temperature in the system). Confined tests resulted in higher values of tensile strength than conventional ones. It can also be seen that the temperature did not fundamentally modify the results when the material is exposed to it for a short period of time. The variability of the samples had small effect on the results. Moreover, the geogrid showed different behavior observed when different areas of the material through the data acquisition methods.

Key-words: Geosynthetics. Confined-heated test. Tensile strength.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Aplicações típicas de geossintéticos em aterros de resíduos. 21

Figura 2 - Barreira de contenção mecânica. 22

Figura 3 - Proteção da margem contra erosão. 23

Figura 4 - Reforço para subleito ferroviário. 23

Figura 5 - Reforço para pavimentação rodoviária. 24

Figura 6 - Muro de solo reforçado 25

Figura 7 - (a) Dimensão de amostra para o primeiro caso; (b) Dimensão de amostra para o segundo e terceiro caso. 29

Figura 8 - Dimensões do corpo de prova no ensaio de tração faixa larga. 29

Figura 9 - Ensaios confinados e não confinados em geossintéticos. 30

Figura 10 - Ensaios confinados realizados com diferentes tensões confinantes e comparados ao ensaio com material isolado. 31

Figura 11 - Interação e movimento solo/geossintético em um muro de solo reforçado. 31

Figura 12 - Sistema Solo-Geossintético no Equipamento de Cisalhamento Direto 32

Figura 13 - Comportamento de um reforço em uma zona de cisalhamento. 33

Figura 14 - Equipamento para ensaio de arrancamento. 34

Figura 15 - Interação solo-geossintético. Movimentos em cada situação. 34

Figura 16 - Curvas de fluência – GTNcurto. 37

Figura 17 - Equipamento não convencional de ensaio de fluência confinado-acelerado em geossintéticos. 38

Figura 18 - Equipamento para aplicação de carregamento no geossintético. (a) Vista frontal, (b) execução do carregamento em ensaio confinado acelerado. 39

Figura 19 - Resistências elétricas. (a) Posicionamento das resistências, (b) resistências envoltas de solo. 40

Figura 20 - Termopares do sistema de aquecimento. 41

Figura 21 - Sistema de confinamento. Aplicação das tensões verticais. 42

Figura 22 - Configuração do corpo de prova. 43

Figura 23 - Vista em planta do posicionamento do motor. (a) configuração original, nas barras externas localizada na parte frontal do equipamento. (b) Modificação, motor localizado no centro da mesa do acessório, barras reforçadas para suporte do carregamento. 45

Figura 24 - Estrutura de filmagem. 46

Figura 25 - Miras para leitura de deslocamento. (a) Pontos fixos em tarugos, (b) pontos no corpo de prova (em detalhe). 47

Figura 26 - Geogrelha biaxial composta por núcleo de poliéster (PET) e cobertura polimérica de proteção de policloreto de vinila (PVC). 48

Figura 27 - Curva granulométrica do solo para confinamento. 50

Figura 28 - Configuração do corpo de prova com área reforçada reduzida. 51

Figura 29 - Corpo de prova com área reforçada reduzida. 52

Figura 30 - Sistema de aquisição de dados por LVDT. Detalhe do posicionamento do LVDT. 54

Figura 31 - Programa Tratamento de análise de imagens. 55

Figura 32 - Curvas do comportamento do corpo de prova em ensaios isolados de resistência à tração e em temperatura ambiente, obtidas pelo ensaio convencional – ASTM D 6637 – e ensaios realizados no equipamento para ensaio confinado-aquecido. 59

Figura 33 - Curvas originais do comportamento do corpo de prova em ensaios aquecidos de resistência à tração aquecida a 36°C. 62

Figura 34 – Curvas interpretadas do comportamento do corpo de prova em ensaios aquecidos de resistência à tração aquecida a 36°C. 63

Figura 35 - Curvas originais do comportamento do corpo de prova em ensaios aquecidos de resistência à tração aquecida a 48°C. 64

Figura 36 - Curvas interpretada do comportamento do corpo de prova em ensaios aquecidos de resistência à tração aquecida a 48°C (A48). 64

Figura 37 - Módulo de rigidez. Comparação entre as diferentes temperaturas propostas. 66

Figura 38 - Curvas originais do comportamento do corpo de prova em ensaios confinados (C) e não confinados (NC). 66

Figura 39 - Curvas interpretadas do comportamento do corpo de prova em ensaios confinados (C) e não confinados (NC). 67

Figura 40 - Módulo de rigidez. Comparação entre o confinamento e o não confinamento. 68

Figura 41 - Curvas interpretadas do comportamento do corpo de prova em ensaios confinados (C). 68

Figura 42 - Curvas interpretadas do comportamento do corpo de prova em ensaios não confinados (NC). 69

Figura 43 - Curvas originais do comportamento do corpo de prova em ensaios confinados-aquecido. 69

Figura 44 - Curvas interpretadas do comportamento do corpo de prova em ensaios confinados-aquecido. 70

Figura 45 - Módulo de rigidez. Comparação entre o confinamento à temperatura ambiente e o confinamento aquecido a 36°C. 71

Figura 46 - Curvas originais do comportamento do corpo de prova em ensaios não confinados à temperatura ambiente – área reforçada de 300 mm. 72

Figura 47 - Curvas originais do comportamento do corpo de prova em ensaios não confinados à temperatura ambiente – área reforçada de 100 mm. 73

Figura 48 - Curvas originais do comportamento do corpo de prova em ensaios não confinados à temperatura ambiente – sem área reforçada. 75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos geossintéticos. 17

Tabela 2 - Geossintéticos e suas principais funções. 18

Tabela 3 - Caracterização da geogrelha. 48

Tabela 4 - Característica do solo confinante - areia média a grossa. 49

Tabela 5 - Características dos testes realizados para a calibração da temperatura. 54

Tabela 6 - Nomenclatura dos ensaios realizados na segunda bateria – aquisição de dados por LVDT e Imagem. 56

Tabela 7 – Nomenclatura dos ensaios realizados na primeira bateria – aquisição de dados por LVDT 57

Tabela 8 - Equações do gráfico - comportamento do material no equipamento de ensaio confinado-aquecido. 60

Tabela 9 - Equações do gráfico - comportamento do material na maquina universal. ... 61

Tabela 10 - Resultados gerais dos ensaios de resistência à tração. 61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
GTNcurto	Geotêxtil não tecido de filamento curto
IGS	International Geosynthetics Society
LVDT	Linear variable differential transformer
PEAD	Polietileno de alta densidade
PET	Poliéster
PVC	Policloreto de vinila

SUMÁRIO

1 Introdução 15

2 Objetivos 16

3 Revisão bibliográfica 17

3.1 Geossintéticos 17

3.1.1 Propriedades dos geossintéticos 19

3.1.2 Aplicações dos geossintéticos 20

3.1.3 Reforços geossintéticos 25

3.2 Propriedades de tração de geossintéticos 27

3.2.1 Ensaio de tração convencional 28

3.2.2 Ensaios de tração confinada 29

3.2.3 Diferentes formatos de ensaio de tração confinada 31

3.3 Considerações finais 35

4 Materiais e métodos 36

4.1 Equipamento para ensaios de tração não confinada e confinada 36

4.1.1 Configuração do equipamento não convencional – ensaio de fluência confinada-acelerada 36

4.1.2 Configuração do corpo de prova – ensaio de fluência confinada-acelerada . 42

4.1.3 Adaptações no equipamento 43

4.2 Geossintético 47

4.3 Material confinante 48

4.4 Configuração dos corpos de prova 50

4.5 Ensaios realizados 52

4.1.1 Montagem dos ensaios 52

4.1.2 Nomenclatura dos ensaios 56

5 Resultados e discussões 58

5.1 Comparação entre ensaio convencional e ensaio não convencional de resistência à tração 58

5.2 Ensaios aquecidos de tração não confinada 61

5.3 Tração confinada x tração não confinada 66

5.4 Tração confinada-aquecida 69

5.5 Comparação de LVDT e ADI 71

6 Conclusões e sugestões 76

6.1 Conclusões 76

6.2 Sugestões para futuras pesquisas 77

1 Introdução

Os geossintéticos são materiais que foram elaborados com o intuito de auxiliar a engenharia civil em obras geotécnicas, hidráulicas e rodoferroviárias. Esses materiais sintéticos proporcionam a esses projetos agilidade na execução e ideias que permitem um maior grau de liberdade em seu planejamento. Reforços de talude, de solo mole, de pavimento, entre outras aplicações são realizados com o uso desses materiais preparados para receberem a solicitação de esforços de tração. Os geossintéticos mais comumente utilizados para esse fim são os geotêxteis, as geogrelhas e as geocélulas. Para o uso desses materiais se faz necessária a verificação por ensaios que indicam se o geossintético está apto às condições exigidas no projeto. Ensaios normalizados de tração ocorrem de forma que o corpo de prova seja analisado de forma isolada, sem contato com o solo ou qualquer outro material, tornando o projeto conservador, pois é desconhecido o verdadeiro comportamento de resistência do geossintético nas reais condições de aplicação.

Um equipamento não convencional foi desenvolvido na Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo – a fim de reproduzir as condições de obra as quais os geossintéticos serão expostos (FRANÇA et al., 2011). Este equipamento foi primeiramente construído para a realização de ensaios de fluência, sendo capaz de simular as condições de confinamento e também acelerar o tempo de ensaio, diminuindo as horas necessárias, por norma para se caracterizar a fluência de um material. Este trabalho abordará um novo caráter para este equipamento. Ensaios de tração foram realizados com o propósito de averiguar a possibilidade do equipamento não convencional ser útil para testes com essa propriedade mecânica. O material empregado nos ensaios foi a geogrelha. Esta possui estrutura no formato de grelha que podem ser quadradas ou triangulares e são classificadas considerando a forma de fabricação de suas tramas ou malhas e pelo polímero nela utilizado. A geogrelha está entre os materiais geossintéticos mais utilizados para reforço, possuindo características únicas que serão mensuradas nestes ensaios.

2 Objetivos

Para melhor compreensão da interação entre o solo e o material geossintético, este estudo se desenvolve com base em um equipamento para fluência confinada-acelerada desenvolvido por França et al. (2011). Os objetivos do estudo estão listados a seguir:

a. Adaptar o equipamento não convencional de fluência confinada-acelerada para que possa realizar ensaios de resistência à tração confinada-aquecida em geossintéticos.

b. Realizar ensaios de resistência à tração em geogrelhas no equipamento não convencional com o propósito de compará-los aos dados de ensaios convencionais dessa propriedade do material.

c. Verificar o comportamento das geogrelhas em diferentes situações de ensaio no equipamento adaptado.

3 Revisão bibliográfica

Este capítulo tem como objetivo apresentar o contexto no qual o trabalho está envolvido. Primeiramente é realizada uma apresentação dos materiais geossintéticos, destacam-se os principais tipos encontrados no mercado, as aplicações em obras de engenharia e suas principais propriedades para realizações de ensaios. Em seguida discorre-se sobre o reforço por geossintéticos e os ensaios em materiais destinados a cumprir resistência à tração em obras.

3.1 Geossintéticos

Materiais planos, poliméricos, de origem natural ou sintética, em combinação com solo, rocha ou outro elemento da geotecnia que são utilizados em obras de engenharia, assim são definidos os geossintéticos de acordo a Sociedade Internacional de Geossintéticos (IGS - International Geosynthetics Society). A Tabela 1 apresenta a classificação para os geossintéticos baseada nas definições da IGS.

Tabela 1 - Classificação dos geossintéticos.

Classificação	Definição
GTX Geotêxteis	São materiais flexíveis e permeáveis. A sua fabricação pode ser de forma tecida, não tecida, em malha, fios ou fibras tricotadas.
GGR Geogrelha	Possui estrutura no formato de grelha que podem ser quadradas ou triangulares. A sua fabricação pode ser em tramas ou malhas.
GNT Georrede	Tem sua estrutura em forma de rede que apresenta porosidade em sua composição.
GMB Geomembrana	Mantas flexíveis com baixa ou baixíssima permeabilidade, podendo ser fabricas a partir de um ou mais materiais sintéticos.
GCO Geocomposto	Recebe a função de dois ou mais geossintéticos, é fabricado a partir da combinação de outros materiais desse seguimento.
GCL Geocomposto Argiloso	É um geocomposto pré-fabricado que contém em sua composição argila envolvida por geotêxtil ou também podendo ser envolvido com geotêxtil mais a geomembrana.
Geotubo	São tubos poliméricos perfurados que podem, ou não, ser envolvidos por geotêxteis.
GCE Geocélula	São redes tridimensionais formadas por tiras poliméricas. Podem ser utilizadas em conjunto com o solo ou concreto.
Geoexpandido	São blocos ou placas criadas a fim de criar uma rede de baixa densidade. É obtido pela expansão de espuma de poliestireno, essa expansão forma células fechadas cheias de gás as quais caracterizam a baixa densidade do material.

Fonte: International Geosynthetics Society- IGS.

Os geossintéticos podem ser empregados de formas variadas, sendo as suas principais funções a de separação, drenagem, filtração, reforço, controle de erosão e barreira, apresentadas na Tabela 2. A separação ocorre quando o material é posicionado na forma qual ele fique compreendido entre solos de gramaturas diferentes, muito usado em obras rodoviárias. Para a drenagem, os geossintéticos são instalados de maneira que permita o fluxo do fluido que se deseja transportar por meio dos solos menos permeáveis. A filtração acontece quando a manta utilizada permite que o fluido atravesse o material sem que esse arraste consigo o solo a montante. O reforço permite uma maior liberdade na execução de projetos de aterros e taludes, o geossintético atua como um elemento de reforço dentro de um volume de solo e tem o intuito de melhorar as suas características físicas. No controle de erosão as mantas são dispostas sobre o solo exposto de maneira a reduzir a erosão ocasionada por chuvas, por escoamentos superficiais ou mesmo por ventos. As barreiras são utilizadas em locais onde se deseja tornar a camada impermeável, tanto para fluidos, quanto para gases, são executadas com materiais de baixa permeabilidade (Bathurst, 1999).

Tabela 2 - Geossintéticos e suas principais funções.

Geossintéticos	Funções						
	Separação	Proteção	Filtração	Drenagem	Erosão	Reforço	Barreira
Geotêxtil	X	X	X	X	X	X	X[1]
Geogrelha	X	-	-	-	-	X	-
Geomembrana	X	-	-	-	-	-	X
Georrede	-	X	-	X	-	-	-
Geocélula	-	X	-	-	X	X	-
Geotubo	-	-	-	X	-	-	-
Geofibras	-	-	-	-	-	X	-
Geocomposto	-	-	-	X	-	X	X[2]

Fonte: Castro (2008) e Vertematti (2004).
(1) Em conjunto com material asfáltico.
(2) Incluindo o geocomposto argiloso.

Para Zornberg (2012), os geossintéticos já podem ser considerados uma tecnologia ajustada dentre as soluções de engenharia, contudo, a versatilidade desses materiais promove mudanças e progressos dentro de suas próprias características. Isso se deve ao fato de que o custo-benefício da utilização dos geossintéticos promove essa busca por novas aplicações, tanto por parte do construtor quanto por parte do fabricante.

3.1.1 Propriedades dos geossintéticos

O desempenho de um geossintético precisa ser garantido para que ele possa exercer sua função adequadamente no projeto, Bueno (2003) acredita que o geossintético deve passar por um rigoroso controle de qualidade a ser realizado pelo fornecedor e pelo usuário do produto. Ensaios são efetuados a fim de proporcionar informações sobre o material selecionado, a confiabilidade dos resultados é adquirida com base nas normas específicas de execução. Avalia-se o material de acordo com as condições de obra as quais estará exposto, como incidência de raios ultravioleta, lixiviados, tensões, entre outras degradações.

A classificação dos ensaios leva em consideração o tipo de propriedade a ser mensurada, que podem ser propriedades físicas, de desempenho, hidráulicas ou mecânicas (SHUKLA; YIN, 2006). Ensaios de caracterização e ensaios de comportamento são formas distintas de se avaliar um geossintético. Os ensaios de caracterização avaliam as propriedades físicas, mecânica e hidráulicas dos geossintéticos, descritas a seguir. Já o ensaio de comportamento verificam a conduta que os materiais devem apresentar em obra e as intempéries envolvidas no meio. Estes verificam as propriedades funcionais do geossintético, ou seja, propriedades de desempenho. Há também as propriedades requeridas, estas são utilizadas em cálculos de projetos, pois, se tem a necessidade de avaliar o material em favor da segurança dos usuários. (TRENTINI; VIDAL, 2005)

a. Propriedades físicas

As propriedades físicas, também consideradas propriedades de índice de geossintéticos, indicam massa, densidade, porosidade, espessura do material e sua rigidez. Os ensaios que determinam as propriedades físicas são de fácil execução. Alguns materiais necessitam de ensaios específicos, como as geogrelhas e georredes que são avaliadas perante outros índices físicos como o tamanho da abertura, forma, tipo de junção e estrutura (SHUKLA; YIN, 2006).

b. Propriedades mecânicas

Entendem-se como propriedades mecânicas, as avaliações expressas em carregamento por deformações. Os ensaios de tração, fluência, punção e rasgo têm distinções para cada tipo de material a ser analisado e determinam as características efetivas a serem consultadas para o uso em obras. São de fácil aplicação e realizados de forma isolada do meio (KOERNER, 2005; VERTEMATTI, 2004).

c. Propriedades hidráulicas

Segundo Vertematti (2004), as caracterizações do material em relação as propriedades hidráulicas são de extrema importância para o conhecimento do projetista devido a constante solicitação da capacidade do material durante a vida útil da obra a qual ele foi empregado. A drenagem e a filtração são os atributos dos geossintéticos que contém comportamento hidráulico, estes são aferidos de acordo com sua permeabilidade, permissividade, transmissividade e filtração.

d. Propriedades de desempenho

Em relação aos ensaios de desempenho, estes procuram assimilar as características dos locais onde serão utilizados os geossintéticos. Provocam as situações encontradas em obra. O contato com o solo, exposição à lixiviados e raio ultravioleta, por exemplo. Ensaios de tração e fluência confinados, ensaios de arrancamento, resistência a intempéries e degradação química, são uns dos vários ensaios de desempenho dos materiais (VERTEMATTI, 2004).

3.1.2 Aplicações dos geossintéticos

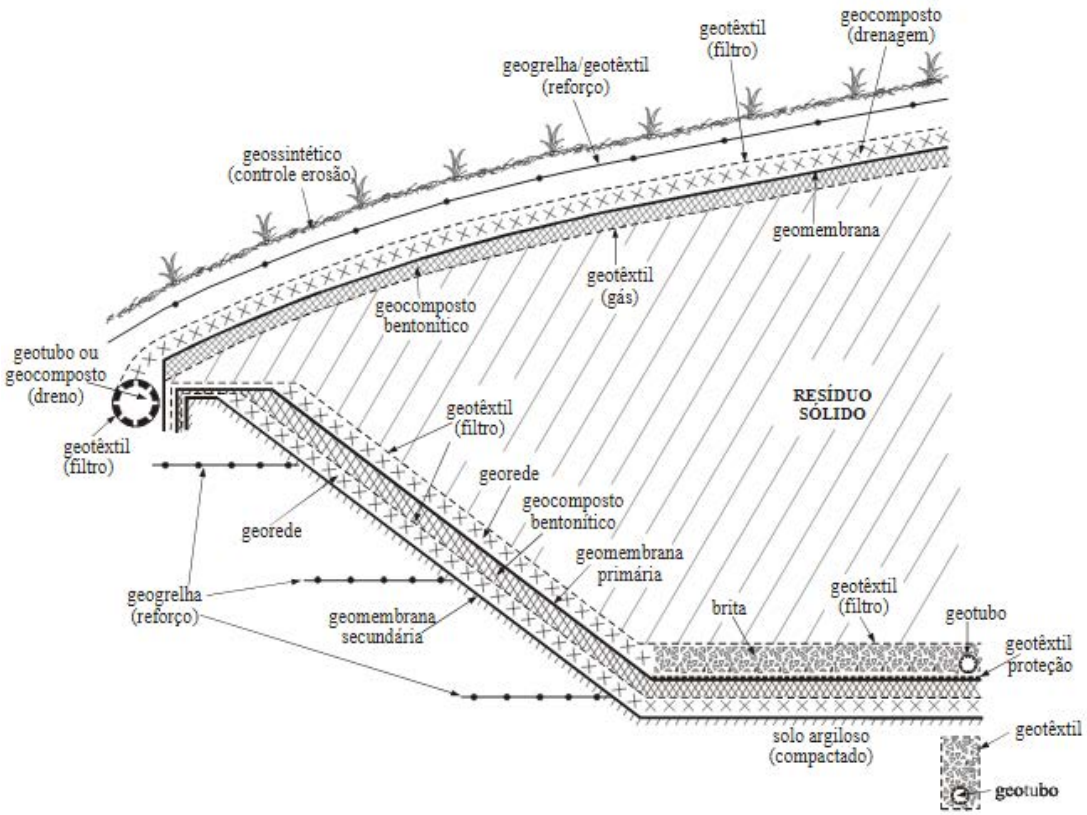
A multiplicidade das funções dos geossintéticos faz com que estes sejam cada dia mais utilizados na construção civil. Segundo o Comitê Técnico de Geossintéticos, as aplicações destes alcançam quatro diferentes áreas: obras geotécnicas e viárias, obras de proteção ambiental, obras hidráulicas e costeiras e outras aplicações como obras industriais e construção civil em geral. Para um maior entendimento da implantação desse material, as áreas serão divididas na seguinte sequência: engenharia ambiental; engenharia hidráulica; infraestrutura e estradas de transporte; obras de terra e fundações.

a. Engenharia ambiental

Na área do meio ambiente, os geossintéticos podem atuar tanto na recuperação de áreas contaminadas, quanto na preservação destas, na forma de aterros sanitários, por exemplo. Particularmente, a engenharia ambiental é a que engloba a maior variedade desses materiais em uma mesma obra, isso ocorre pela complexidade do sistema de proteção.

A principal associação dos geossintéticos com o meio ambiente é a barreira impermeabilizante utilizada em sistemas de contenção de resíduos em geral (aterros sanitários, reservatórios de estações de tratamento, tanque de equalização do lodo) que dificulta consideravelmente a passagem de fluídos para a área externa a esse sistema, isso ocorre devido à utilização de materiais considerados impermeáveis, além desse fator principal, os geossintéticos exercem outras funções para proteção ou mitigação de danos no meio ambiente (VILAR, 2004; VERTEMATTI, 2004). A Figura 1 simula um aterro de resíduos e suas possibilidades de geossintéticos.

Figura 1 - Aplicações típicas de geossintéticos em aterros de resíduos.



Fonte: Koerner (2005).

b. Engenharia hidráulica

Em Vertematti (2004) as obras hidráulicas de contenção são divididas de acordo com suas funções principais. A primeira é em relação a contenção de erosão superficial, que ocorre em margens e também nos fundos dos canais, rios, lagos e regiões costeiras, tem como principal objetivo garantir que a ação da água no solo seja inexpresiva na origem de novas conformações nas seções do elemento estudado. A segunda contenção é relacionada aos aterros mecânicos e hidráulicos, neste caso a estrutura funciona como um dique que impede a passagem da água de um sistema para outro. O terceiro tipo de contenção leva em consideração os fluxos hidráulicos, atua diretamente em correntes fluviais e marítimas, controlando-as de forma a garantir a segurança do meio, além de uma otimização do uso da água. Outras obras hidráulicas, de mais fácil execução, podem ser destacadas, como drenagem, filtração e impermeabilização. A Figura 2 ilustra uma barreira de contenção mecânica utilizada para conter o avanço do mar sobre a faixa de areia, já na Figura 3 pode-se observar a disposição de geotexteis na margem de um canal, sendo utiizada para proteger essa margem contra erosão.

Figura 2 - Barreira de contenção mecânica.

Fonte: Huesker (1999).

Figura 3 - Proteção da margem contra erosão.

Fonte: Huesker (1999).

c. Infraestrutura de estradas e transporte

Nas Figuras 4 e 5, pode-se observar a utilização dos geossintéticos como reforço para estruturas de transporte. A primeira figura, o geotêxtil é disposto como reforço de base em uma linha férrea. A segunda figura mostra uma rodovia que tem como uma de suas bases uma camada de geogrelha.

Figura 4 - Reforço para subleito ferroviário.

Fonte: Terram (2013).

Figura 5 - Reforço para pavimentação rodoviária.

Fonte: Bonar (2013).

A infraestrutura de transporte engloba aeroportos, ferrovias e rodovias. Nestes casos se torna importante a capacidade de suporte do solo para que a estrutura possa alcançar uma durabilidade em melhores condições. Os geossintéticos proporcionam a essas obras uma maior economia comparando o seu uso com os projetos tradicionais, pois garantem o desempenho da estrutura e ainda reduzem a espessura das camadas bases. (BARBOSA, 2010; TAFFE et al., 2002).

d. Obras de terra e fundações

Complexidade é um termo que bem se adequada em obras de terra e fundações. Na elaboração destas requer cuidados com seus cálculos e sua execução, uma maior segurança foi encontrada com o emprego de materiais geossintéticos na geotecnia.

Comumente as obras de grande porte procuram ser instaladas em áreas com estabilidade e grandes dimensões, porém há escassez na disponibilidade desses terrenos. Portanto, com a tecnologia dos geossintéticos, mais espaços se tornam aptos para construção de indústrias, edifícios, entre outras obras que exigem um maior suporte do solo.

Outra vantagem vem da economia que é gerada com o reforço e auxilio desses materiais, como o exemplo de solos que em muitas ocasiões têm de ser retirados, pois apresentam baixa capacidade de suporte para fundações, essas operações geram alto

custo para o orçamento da obra, estes passam a ser simplesmente reforçados com geossintéticos, evitando a retirada desse solo.

Em maciços de solo reforçado, o principal benefício é dado pela economia de espaço, pois o reforço permite ao talude ou aterro uma inclinação mais íngreme. Além dos casos de fundações e maciços mencionados no texto, Vertematti (2004) cita outras aplicações de geossintéticos em obras de terra e fundações, como os aterros sobre solos moles, estacas e cavidades.

A Figura 6 mostra uma estrutura de solo reforçado, elas são estruturas de contenção constituídas por um maciço de solo reforçado e elementos resistentes a esforços de tração, como as geogrelhas.

Figura 6 - Muro de solo reforçado

Fonte: Borges (2011).

3.1.3 Reforços geossintéticos

Dentre as principais funções dos geossintéticos encontra-se a função de reforço. Estes são utilizados em muros de contenção de solo, encostas, estradas, sistema de contenção de resíduos, como os aterros sanitários. As vantagens acarretadas por este material estão relacionadas com a facilidade de manuseio, excelente interação com o solo e estruturas resultantes com uma característica mais natural e com maior

flexibilidade. O comportamento desses é influenciado pela estrutura e tipo de polímero, processo de fabricação, condições de instalação e local de aplicação. Além de conhecer o comportamento do geossintético devido a essas influências, para se realizar projetos de reforço de solo por geossintético é necessário o conhecimento de três parâmetros básicos: resistência útil em longo prazo, módulo de rigidez de longo prazo e interação material/solo (PORTELINHA, 2012; KOERNER, 2005; LING; LIU; MOHRI; KAWABATA., 2001).

A reação de um corpo contra a ação de outro corpo é caracterizada como resistência. Os esforços aplicados pelo meio, onde se é empregado o geossintético, geram ações sobre a estrutura do material fazendo com que este reaja de forma a solicitar a sua resistência. A resistência à tração dos materiais é o principal parâmetro analisado para o cálculo do uma estrutura de reforço.

Em geossintéticos, a resistência tem uma importância maior pelo fato destes materiais terem uma estrutura polimérica mais susceptível a fenômenos de fluência. Em projetos geotécnicos, onde serão empregados geossintéticos, é recomentado que usem a chamada resistência útil – resistência de projeto – nos cálculos. Para se conhecer a resistência útil é necessário que sejam inseridos fatores de redução no projeto. Cada tipo de produto possui seus próprios fatores de redução. Pelas especificações do fabricante ou na literatura podem-se encontrar valores para estes fatores de redução (HOULSBY; JEWELL, 1990; TRENTINI; VIDAL, 2005; TRENTINI, 2005).

Koerner (2005) e Jewell (1996) demonstram a influência do fator de redução indicando que a resistência necessária pelo projeto deve ser recalculada verificando a influência de quatro fatores: fator de redução por fluência, devido ao período do serviço; fator de redução por eventuais ações ambientais, químicas ou biológicas; fator de redução por danos mecânicos, principalmente pelos ocasionados durante a instalação do material, e; fator de segurança relacionado a incertezas referentes ao material.

Outro fator de importância para o estudo de geossintéticos é o módulo de rigidez. O módulo de rigidez de um material relaciona a taxa de variação da deformação como função da tensão em um corpo de prova submetido a uma carga de cisalhamento

ou torção. Ele proporciona a rigidez desse material sólido, sendo assim, verifica sua tensão de ruptura. Com a finalidade de estabelecer padrões para as caracterizações técnicas do material, o módulo de rigidez é obtido e informado pelos fabricantes. O módulo de rigidez permite verificar qual a deformação que o geossintético sofrerá quando aplicado um determinado nível de carga, portanto, quanto maior o módulo, maior a rigidez e maior a resistência. Estruturas menos complexas, como geogrelhas e geotêxteis tecidos, sofrem menos reduções no módulo de rigidez devido a danos em relação a materiais com estruturas mais complexas, como os geotêxteis não tecidos. Outro fator que pode alterar o módulo de rigidez é o material utilizado na fabricação do geossintético (LOPES; LOPES, 2010).

Já a interação solo/geossintético é representada por dois parâmetros principais. Um deles é a resistência ao deslizamento direto do solo sobre o reforço que pode ser caracterizado por ensaios de cisalhamento direto. Avalia as tensões entre a interface do geossintético e o solo. O deslizamento ocorrente neste local gera planos de rupturas paralelos ao reforço. O outro é a resistência ao arrancamento do reforço implantado no solo. O solo tem uma resistência maior que o material de reforço, sendo assim, quando o geossintético é solicitado à tração este se desloca paralelamente ao solo, não alterando a estrutura do solo (AGUIAR, 2008). As interações entre o solo e o geossintético são verificadas em ensaios de resistência confinados, que são apresentados a seguir.

3.2 Propriedades de tração de geossintéticos

Os parâmetros e as características que influenciam na vida útil dos geossintéticos podem ser conhecidos tanto em laboratório quanto por meio de ensaios em campo. As propriedades de tração são analisadas a seguir em dois tópicos e ambos abordam ensaios de comportamento do material em laboratório. O primeiro aborda os ensaios que são realizados em laboratório da forma convencional e o segundo tópico verifica os ensaios que simulam o comportamento do material em campo, averiguando a interação entre o material e o solo.

3.2.1 Ensaio de tração convencional

Os ensaios de tração convencionais estão compreendidos entre os ensaios de propriedades mecânicas dos geossintéticos. A norma técnica que os abrange é a NBR 10319: Geossintéticos – Ensaios de tração faixa larga. Recentemente modificada, ela auxilia no controle e na execução dos ensaios. Vertematti (2004) fala que a tração faixa larga é um ensaio usualmente aplicado nos geotêxteis e nas geogrelhas, o ideal é a aplicação de ensaios em seus elementos isolados, devido à capacidade do equipamento de aplicação à tração. As geogrelhas são materiais mais resistentes e, por isso, exigem uma maior capacidade do equipamento quando realizados ensaios de tração faixa larga. Contudo, os resultados finais, tanto em faixa larga como em elementos isolados, se mostram idênticos.

Os ensaios nas geogrelhas podem ser realizados de algumas formas:

- Testando um único elemento da geogrelha em relação a sua tensão de tração (N ou lbf);
- Testando vários elementos da geogrelha em relação a sua tensão de tração (kN/m ou lbf/ft);
- Testando vários elementos de múltiplas camadas de geogrelha em relação a sua tensão de tração (kN/m ou lbf/ft).

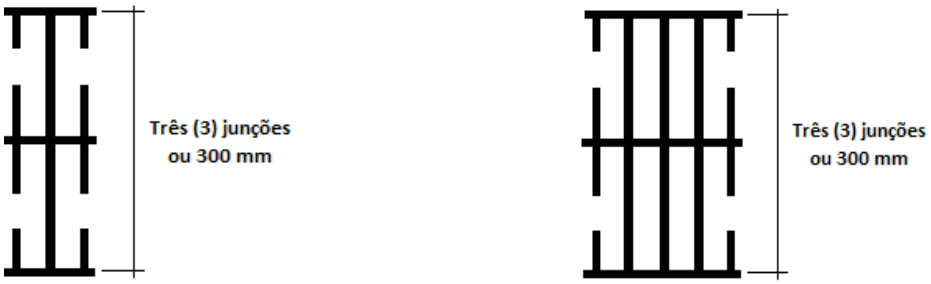
No primeiro caso, a amostra contém uma nervura representativa na direção transversal de ensaio, e três junções paralelas à direção na qual a tração é medida (Figura 7a), o ensaio ocorre até o elemento romper ou apresentar falhas, sua resistência à tração é obtida com a média de seis ensaios.

No segundo caso, a amostra apresenta três junções paralelas à direção na qual a tração é medida, igualmente ao caso anterior, só com a diferença que em sua largura conterá cinco elementos para serem avaliados, seus resultados são anotados por um computador conectado ao equipamento.

O último caso é equivalente ao anterior, só modificando a quantidade de camadas de corpos de prova de geogrelha analisados ao mesmo tempo - ambos são

representados pela Figura 7b (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERILAS- ASTM, 2001; KOERNER, 2005; VERTEMATTI, 2004).

Figura 7 - (a) Dimensão de amostra para o primeiro caso; (b) Dimensão de amostra para o segundo e terceiro caso.

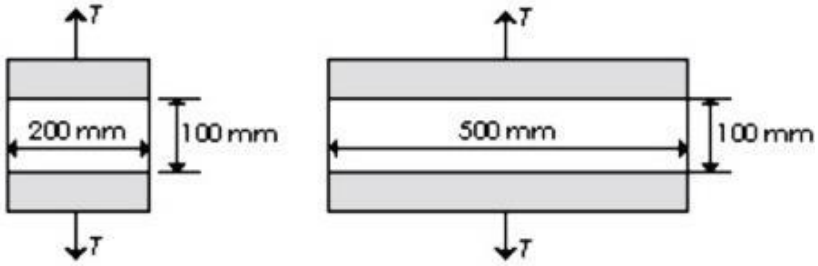


(a) (b)

Fonte: ASTM (2001).

As dimensões dos ensaios faixa larga, o mais comum nos laboratórios, se apresentam de duas formas, ambos demonstrados na Figura 8, na primeira a faixa de interesse apresenta as medidas de 100 x 200 mm, já na segunda sua largura se apresenta maior, sendo 100 x 500 mm.

Figura 8 - Dimensões do corpo de prova no ensaio de tração faixa larga.



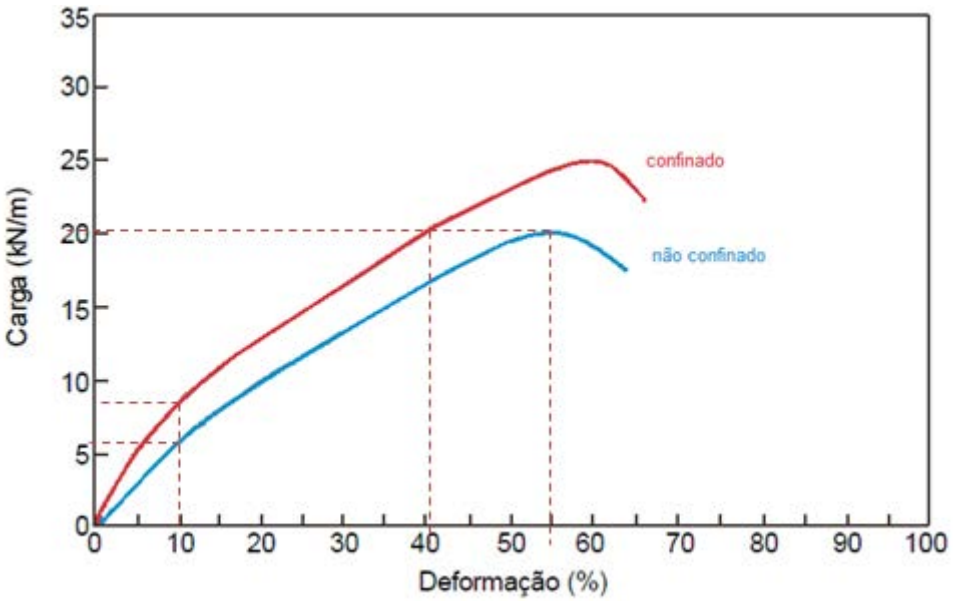
Fonte: Vertematti (2004).

3.2.2 Ensaios de tração confinada

Ballegeer e Wu (1993) realizaram testes de tração confinada e não confinada com o intuito de se aprofundar no conhecimento em relação às diferenças existentes entre estes ensaios. Eles chegaram à conclusão que o material que recebe confinamento apresenta um aumento em sua rigidez além de sofrer menores deformações. Estas

informações podem ser conferidas no gráfico da Figura 9 onde há a sobreposição dos dois diferentes tipos de ensaios e nota-se o comportamento diferenciado do material nas distintas situações. O gráfico dos ensaios de Ballengeer e Wu (1993) corresponde a resultados obtidos por materiais geotêxteis não tecidos agulhados de PET. Já para geotêxteis tecidos os resultados obtidos sofrem menor influência do confinamento.

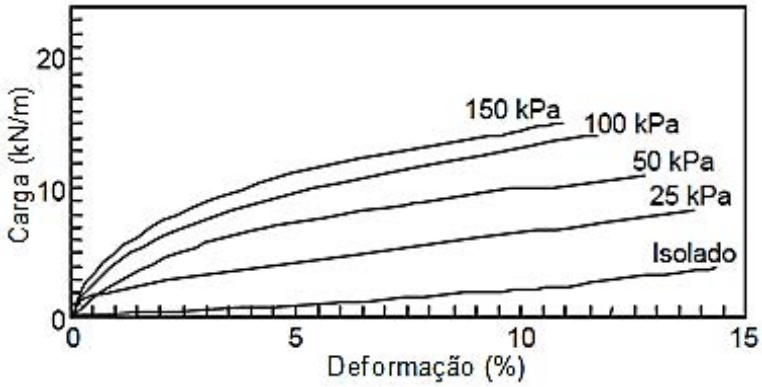
Figura 9 - Ensaios confinados e não confinados em geossintéticos.



Fonte: Ballengeer e Wu (1993).

Tupa e Palmeira (1995) realizaram ensaios confinados de resistência à tração em material geotêxtil não tecido agulhado de PET submetido a diferentes tensões de confinamento comparadas ao material em isolamento, sendo silte o solo confinante. Analisando o gráfico da Figura 10, nota-se que quanto maior a tensão de confinamento, maior a carga solicitada para ruptura.

Figura 10 - Ensaios confinados realizados com diferentes tensões confinantes e comparados ao ensaio com material isolado.



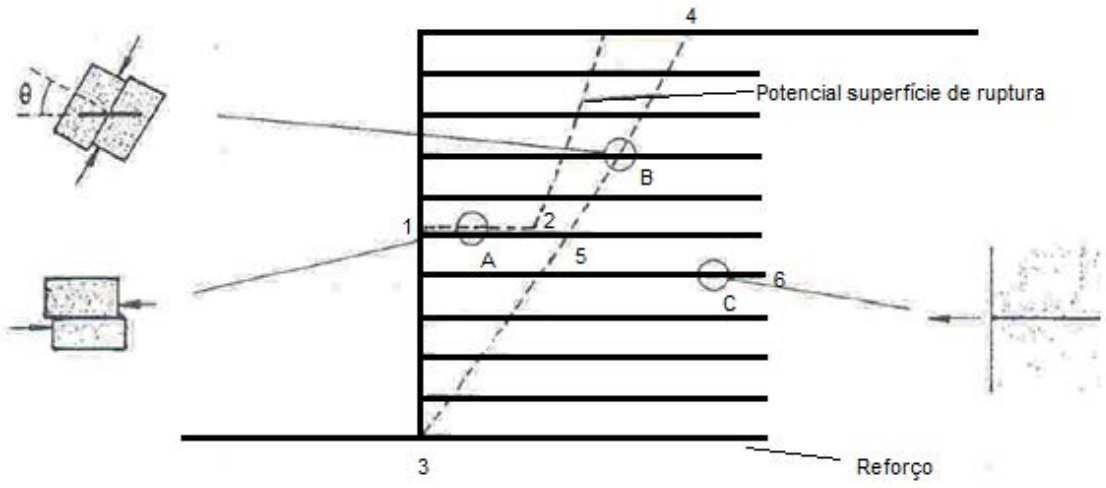
Fonte: Tupa e Palmeira (1995).

3.2.3 Diferentes formatos de ensaio de tração confinada

A melhor retratação do comportamento solo/geossintético é verificada através de ensaios realizados em campo. Porem, por estes ensaios apresentarem altos custos e complexidade em sua execução, pesquisadores da área se empenham em elaborar equipamentos que simulem situações em campo. Estes equipamentos procuram representar, em uma escala reduzida, as ações do solo quando em contato com o material sintético.

Na Figura 11 são apresentados os pontos relevantes de uma estrutura solo/geossintético onde diferentes ações de interação e movimento são encontradas.

Figura 11 - Interação e movimento solo/geossintético em um muro de solo reforçado.



Fonte: Palmeira (1987).

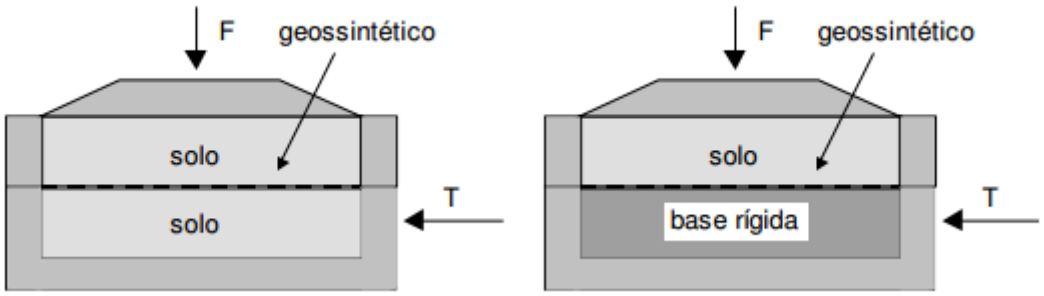
São destacadas na Figura 11 três situações de interação solo/geossintético, estas serão descritas nos subitens a seguir:

a) Cisalhamento direto (destaque em A)

Os ensaios de cisalhamento direto interpretam a relação do atrito na interface solo/reforço. O solo desloca-se paralelamente ao geossintético originando tensões. Estas, que se desenvolvem a partir das deformações da camada de solo imediatamente acima do reforço, formam planos de ruptura paralelos a estes (CASTRO, 1999).

Na Figura 12 são apresentados dois tipos de montagens de ensaios para cisalhamento direto do geossintético. O primeiro (representado a esquerda) mostra o geossintético envolto de duas camadas de solo, já no segundo o geossintético é colado a uma base rígida e o solo é disposto na câmara acima deste conjunto.

Figura 12 - Sistema Solo-Geossintético no Equipamento de Cisalhamento Direto



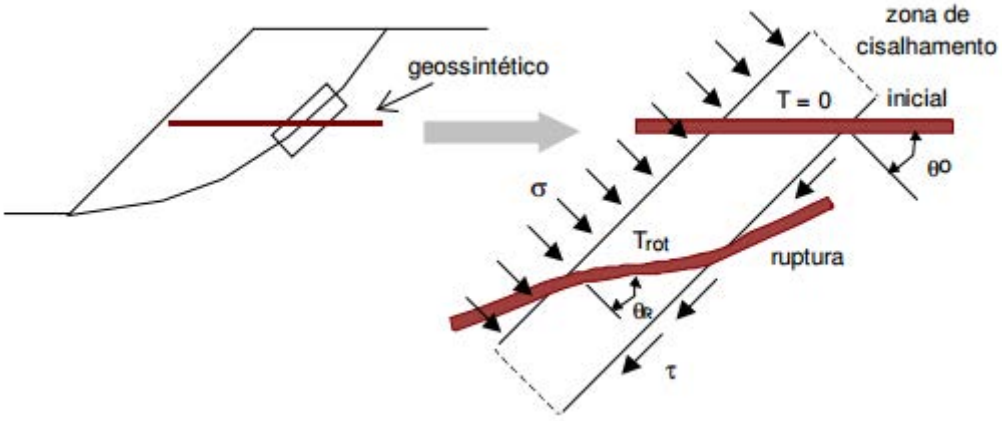
Fonte: Sieira (2003).

b) Cisalhamento direto com reforço inclinado (destaque em B)

A análise da relação entre superfície de potencial deslizamento/ruptura do solo e o reforço é realizada com ensaios de cisalhamento direto com reforço inclinado. Os ensaios são semelhantes aos de cisalhamento direto, mas possuem diferentes disposições dos corpos de prova, fazendo com que estes apresentem uma angulação com a horizontal, sendo esta definida pelo pesquisador. Comportamentos assistidos em ensaios verificam que as inclinações às quais os materiais são submetidos interferem no comportamento deste reforço. O conjunto solo/reforço apresenta um aumento da resistência a tração do meio, o material absorve os esforços cisalhantes quando em contato com a superfície de deslizamento/ruptura. (TEIXEIRA, 2006; JEWELL;

WROTH, 1987) O tracionamento ocasionado e a distribuição de esforços podem ser vistos na Figura 13.

Figura 13 - Comportamento de um reforço em uma zona de cisalhamento.



Fonte: Sieira (2003).

c) Arrancamento

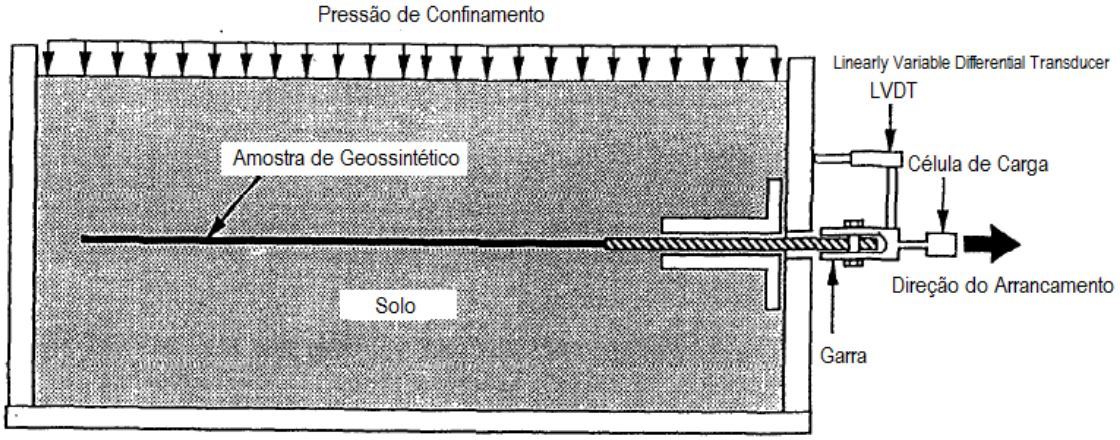
O arrancamento é um dos ensaios realizados para verificar os parâmetros de interface entre o solo e o geossintético e é o mais aconselhado para o estudo desse caso. Verificado em relação ao desempenho do material, compõe o fator de redução para o cálculo do reforço. Este ensaio traduz uma situação de campo e com ele pode ser observado o comportamento do material quando exposto a esforços de tração (Sieira; Sayão, 2008; Bueno, 2003).

Ensaios de arrancamento e cisalhamento direto têm o mesmo objetivo: mensurar as resistências da interface solo/geossintético. Porém, apesar de serem designados para o mesmo propósito, apresentam diferenças em suas configurações e resultados. Estudos estão sendo realizados para verificar a melhor forma de avaliar a interação entre esses dois elementos (FARRAG; ACAR; FARRAG; ACAR; JURAN, 1993).

Para o ensaio de arrancamento as amostras são posicionadas entre duas camadas de solo e posteriormente confinadas através de pressões distribuidas no parte superior do equipamento. Parte da amostra é exposta a parte externa do equipamento onde nela é anexada a garra que proporcionará a carga de arrancamento. As propriedades de tensão e deformação do material são verificadas através de sensores distribuídos pelo

equipamento. O esquema do equipamento para ensaios de arrancamento pode ser visto na Figura 14.

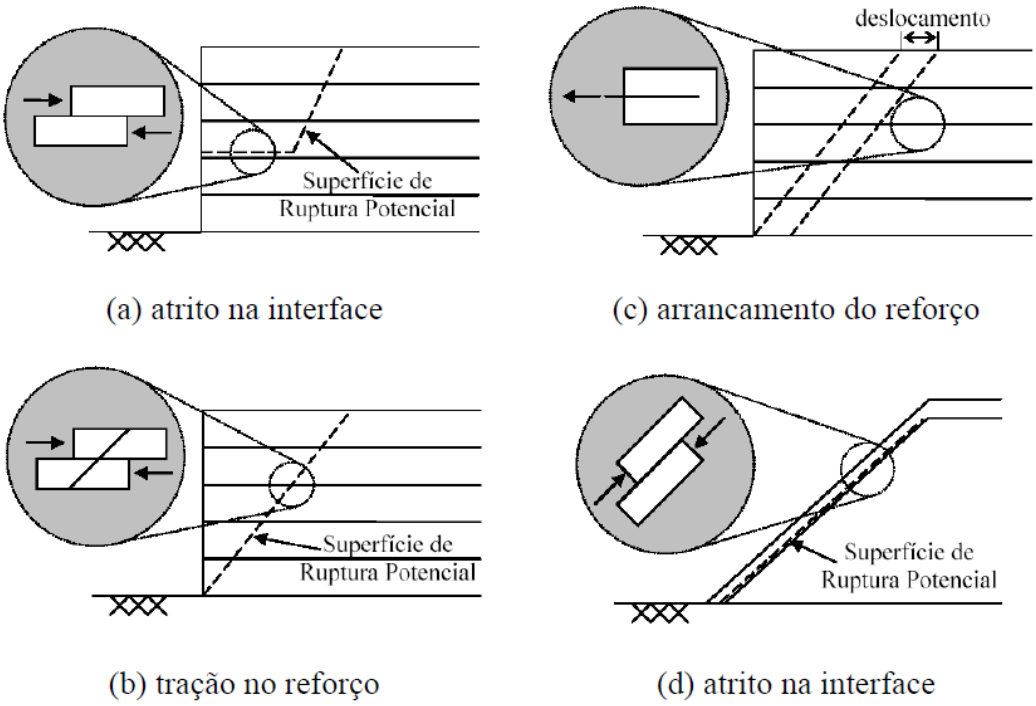
Figura 14 - Equipamento para ensaio de arrancamento.



Fonte: Elias et al. (1998).

Estes ensaios têm a mesma finalidade de verificar a interação entre o material geossintético e o meio confinante – solo. A Figura 15 demonstra com mais detalhes as interações analisadas e descritas anteriormente e os movimentos realizados em cada situação.

Figura 15 - Interação solo-geossintético. Movimentos em cada situação.



Fonte: Aguiar (2008).

3.3 Considerações finais

O capítulo procurou informar ao leitor o contexto no qual este trabalho está inserido. Destacam-se as principais aplicações e tipos. Os ensaios destes materiais têm como finalidade auxiliar no entendimento das ações as quais eles estarão expostos quando utilizados em obras. Portanto, quando os ensaios proporcionam aos geossintéticos situações que se assemelham com as condições reais a que estes serão envolvidos, os resultados garantem maior segurança e economia para as obras, além de proporcionar o aperfeiçoamento destes materiais no uso da engenharia.

4 Materiais e métodos

Este capítulo descreve as características dos materiais utilizados e apresenta o equipamento de fluência confinado-acelerado e as adaptações realizadas neste equipamento para que fosse possível utilizá-lo em ensaios de tração confinado-aquecido no material. Também fala sobre um novo formato de obtenção de dados de deformação adquiridos por imagens. Os procedimentos para realização dos ensaios são destacados ao final do capítulo.

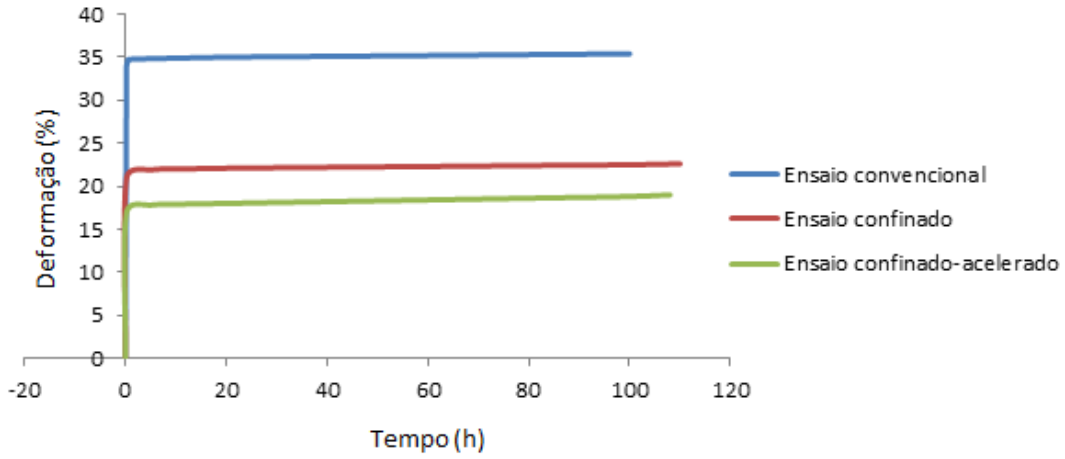
4.1 Equipamento para ensaios de tração não confinada e confinada

4.1.1 Configuração do equipamento não convencional – ensaio de fluência confinada-acelerada

Um equipamento para realização de ensaios de fluência foi desenvolvido por França (2012), ele é capaz de simular condições de confinamento e ao mesmo tempo acelerar o processo de fluência. O equipamento não convencional possibilita um resultado que se assemelha com as condições encontradas em campo e também diminui o tempo de execução de ensaios de fluência que podem variar de 1000 a 10000 horas de ensaio (no método convencional), dependendo da norma a ser seguida. O gráfico da Figura 16 mostra os resultados obtidos em diferentes tipos de ensaios com um mesmo material (GTNcurto).

O ensaio de confinamento foi realizado com a tensão vertical de 30 kPa e a fluência testada a 20% da resistência à tração, pode-se observar uma redução de aproximadamente 80% no índice de fluência do GTNcurto ocasionada pelo confinamento. No ensaio confinado-acelerado foi possível observar um índice de fluência 125% maior em relação ao ensaio confinado, assim nota-se a aceleração da deformação do material devido à temperatura.

Figura 16 - Curvas de fluência – GTNcurto.

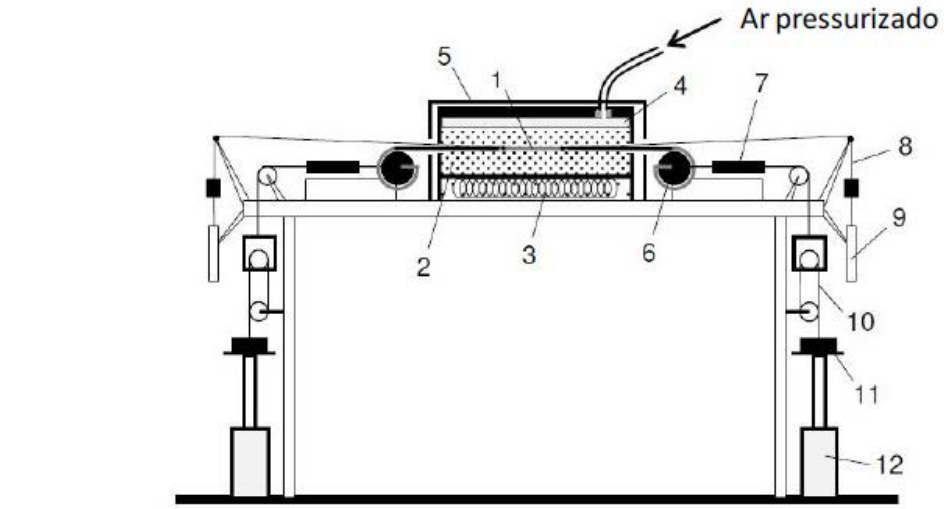


..
Fonte: França (2012).

O equipamento elaborado para conduzir ensaio de fluência confinado-acelerado é composto de uma câmara para a aplicação do confinamento e da temperatura, o corpo de prova é posicionado na horizontal e o seu comprimento é maior do que a largura da câmara para que o material seja conectado as garras, isto é realizado por meio de frestas abertas nas laterais da câmara com 300 mm de largura e 5 mm de espessura. Ele é composto por garras do tipo rolete que são localizadas em ambas as extremidades do corpo de prova, e as garras são conectadas ao sistema de carregamento através de cabos de aço (3,2 mm de diâmetro e resistência nominal a tração igual a 4,45 kN).

Dentro da câmara de ensaio encontram-se os sistemas de aquecimento e confinamento do equipamento, o primeiro fica localizado na parte inferior da câmara e é fixo, não precisando ser remontado a cada ensaio, sendo ligado conforme necessário. Já o segundo sistema é remontado a cada ensaio que envolve confinamento e é localizado na câmara superior que possui dimensões de 250 mm de altura, uma base quadrada de 400 mm de aresta e uma espessura de 12,5 mm. Os dados dos ensaios têm armazenagem computacional, células de cargas são ligadas ao sistema de carregamento para realizar a medição da carga aplicada e a deformação do corpo de prova é medida em dois pontos distintos localizados na área de interesse, por meio de fios inextensíveis estes pontos interligam o material a medição do deslocamento em LVDTs, que são sensores para medição de deslocamento linear. (Avesani, 2013; França, 2012). O equipamento de fluência confinada-acelerada é representado pela Figura 17, e nela são apontadas os posicionamentos de cada elemento do sistema.

Figura 17 - Equipamento não convencional de ensaio de fluência confinado-acelerado em geossintéticos.



1 – Corpo de prova
2 – Compartimento superior da caixa de ensaio (meio confinante e corpo de prova)
3 – Compartimento inferior da caixa de ensaio (sistema de aquecimento)
4 – Bolsa de ar pressurizado
5 – Cobertura em poliestireno expandido
6 – Garra do tipo rolete
7 – Célula de carga
8 – Fio de aço inextensível
9 – Transdutor de deslocamento
10 – Conjunto de polias
11 – Peso livre
12 – Macaco hidráulico

Fonte: França, Bueno, e Zornberg (2011).

A seguir, cada sistema do novo equipamento é detalhado para a melhor compreensão do seu funcionamento.

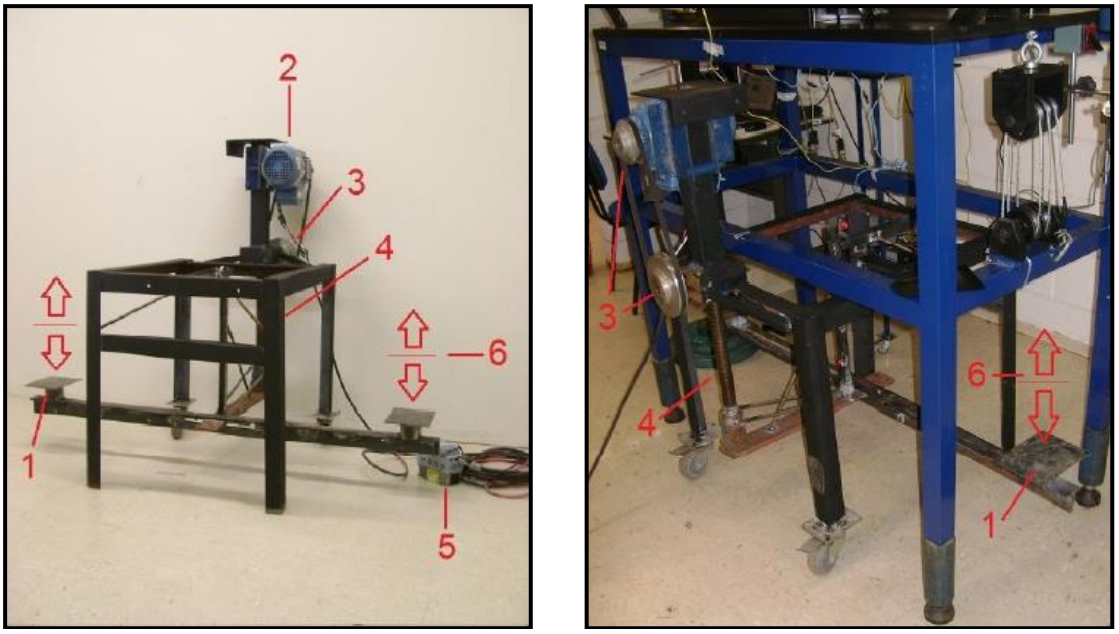
a. Sistema de aplicação de carga

A aplicação de carga originalmente era realizada por meio de macacos hidráulicos posicionados logo abaixo aos pesos livres que aplicavam o carregamento ao corpo de prova, era necessário que dois operadores simultaneamente liberassem a pressão dos macacos hidráulicos. Avesani (2013) modificou o sistema transformando-o de manual para mecânico. O novo modelo de aplicação de carga é capaz de aplicar a solicitação de tração de maneira uniforme e de manter a velocidade de aplicação constante.

O sistema é composto por uma base de sustentação dos pesos livres que é movimentada verticalmente com o auxilio de um motor, a velocidade deste é aplicada

por um controlador (inversor de frequência). A Figura 18 detalha o equipamento de aplicação de carga e apontam o posicionamento de cada elemento.

Figura 18 - Equipamento para aplicação de carregamento no geossintético. (a) Vista frontal, (b) execução do carregamento em ensaio confinado acelerado.



(a)

1 – Base de apoio dos pesos livres;
2 – Motor elétrico;
3 – Polias;

(b)

4 – Rosca sem fim;
5 – Controlador do equipamento (liga/desliga; ajuste da velocidade de carregamento);
6 – Movimento vertical da viga metálica.

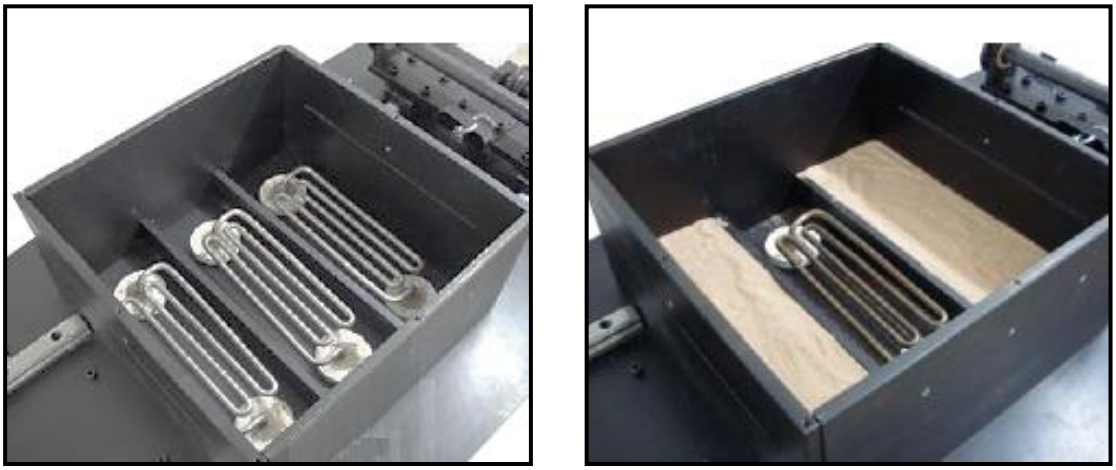
Fonte: Avesani (2013).

b. Sistema de aquecimento

No equipamento não convencional desenvolvido por França (2012) o sistema de aquecimento está localizado na parte inferior da caixa de ensaio. O calor é emitido por três resistências elétricas com potência igual a 1500 W, cada uma é posicionada em seu devido compartimento, o qual é preenchido com material granular a fim de garantir uma continuidade na propagação de calor por todo o sistema (Figura 19).

Para atingir a temperatura necessária de ensaio, o valor das resistências é ajustado com o auxílio de equações matemáticas (detalhadas no próximo capítulo), pois devido à perda de energia para o meio, os valores aplicados às resistências não eram os valores que eram aferidos próximos ao geossintético.

Figura 19 - Resistências elétricas. (a) Posicionamento das resistências, (b) resistências envoltas de solo.



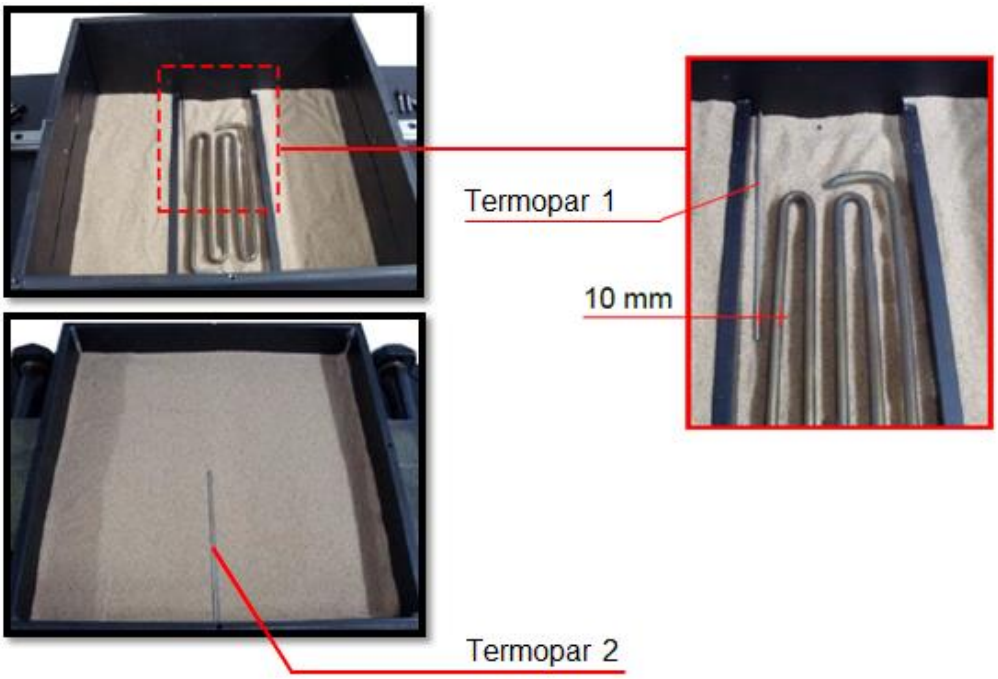
(a) (b)

Fonte: França (2012).

Além das resistências, o sistema é composto por dois termopares (Figura 20) e um controlador de interface computacional. Um termopar fica localizado no sistema de aquecimento e lê à temperatura que é aplicada no sistema, já o outro termopar é inserido diretamente na câmara superior da caixa de ensaio, próximo ao corpo de prova, cerca de 20 mm acima, este lê a temperatura que age no geossintético durante o ensaio.

Os termopares são sensores de temperatura que ligados ao controlador de temperatura permitem a transmissão dos dados para uma base computacional, onde são registradas as medições de ambos os termopares que são lançadas em um mesmo gráfico com a finalidade de comparar os registros.

Figura 20 - Termopares do sistema de aquecimento.

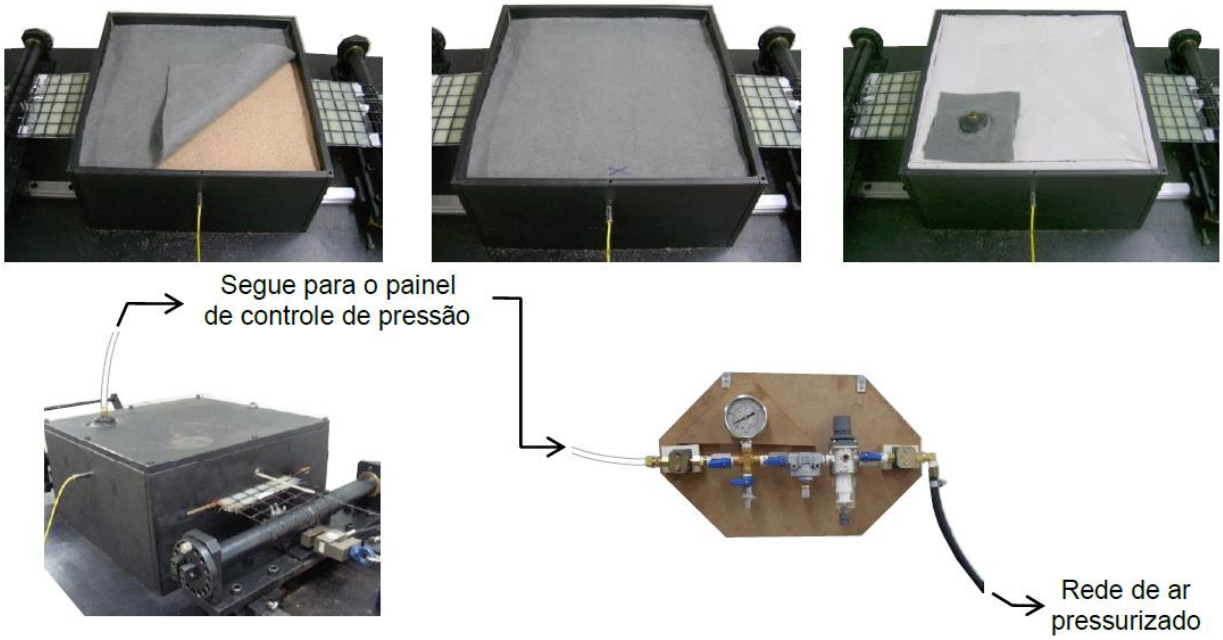


Fonte: França (2012).

c. Sistema de confinamento

O confinamento do sistema é gerado com a disposição do solo na câmara superior do equipamento seguido da ação de tensões verticais obtidas pela aplicação de ar pressurizado na bolsa inflável. Essa configuração de confinamento tem o carregamento acionando o material de forma direta. Primeiro há o arranjo do solo confinante em duas etapas, uma etapa é realizada abaixo da posição do corpo de prova e a outra é realizada acima. Assim concluído, finaliza-se com o posicionamento do sistema de aplicação de tensões verticais, demonstrado pela Figura 21, que ilustra as etapas do confinamento. Primeiramente utiliza-se uma proteção de geotêxtil entre a interface solo e bolsa inflável, com o intuito de protegê-la dos danos que podem ser causados pelo solo quando tensionado. A bolsa de ar é posicionada de tal forma que o orifício onde se aplica o ar pressurizado se depare com o orifício da tampa que fecha o sistema. Após o fechamento da tampa com os parafusos a mangueira de ar pressurizado é ligada ao sistema de forma cuidadosa, evitando que esta se solte em meio ao ensaio. Em sequência, vê-se a mangueira passando pelo painel de controle que regula a pressão do ar que por sua vez é ligado a rede de ar comprimido.

Figura 21 - Sistema de confinamento. Aplicação das tensões verticais.



Fonte: França (2012).

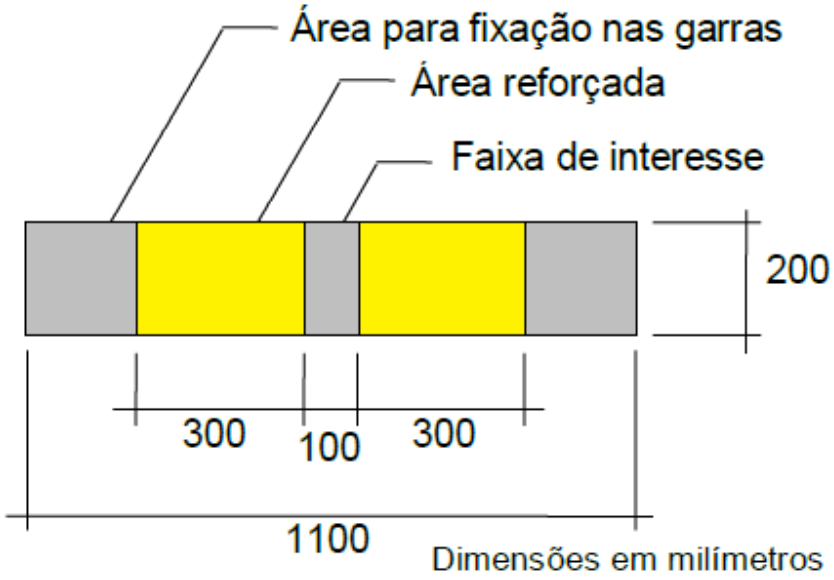
França (2012) verificou a distribuição das tensões verticais totais no interior da câmara de ensaios preenchida apenas com areia e em ensaios onde a câmara era preenchida com areia e o corpo de prova. Em ambos, dois conjuntos de células de tensão foram distribuídos dentro do material confinante, o primeiro conjunto foi posicionado a 12 mm de profundidade e o segundo a 88 mm. Após essa disposição das células de tensão, a pressão de ar no interior da bolsa de ensaios foi aumentada em estágios. O processo gerou a relação dentre os valores de pressão apontados no manômetro do painel de pressão e as leituras de tensão total das células. O meio confinante é submetido a uma tensão vertical média aproximadamente igual àquela aplicada no interior da bolsa de ar. França (2012) comprova com esse procedimento que o sistema de confinamento dos corpos de prova desempenha satisfatoriamente sua função, porém, algumas diferenças foram notadas entre os ensaios em diferentes camadas, mas esse aspecto não influencia de forma significativa o confinamento do material.

4.1.2 Configuração do corpo de prova – ensaio de fluência confinada-acelerada

O corpo de prova para o ensaio confinado-acelerado apresenta uma conformação diferenciada comparada aos dos ensaios convencionais de tração e fluência (Figura 22). Suas dimensões são maiores para que seja possível fixa-los as garras do tipo rolete. O

comprimento do corpo de prova é de 1100 mm e sua largura apresenta 200 mm. Para realização do ensaio é necessário preparar o material, então seu comprimento é dividido em três áreas. Nas extremidades do material é reservada uma área para que o geossintético seja preso na garra tipo rolete, já o centro deste é conhecido como a faixa de interesse que tem dimensão de 200 mm de largura e 100 mm de comprimento. Entre essas duas áreas há uma faixa reforçada com adesivo a base de resina epóxi e recoberta por folha de poliéster. A área reforçada tem o objetivo de impedir o fenômeno de estricção nessa região e também reduzir o atrito na interface entre a área reforçada e o meio confinante.

Figura 22 - Configuração do corpo de prova.



Fonte: França (2012).

4.1.3 Adaptações no equipamento

Adaptações no modo de aplicação de carregamento e no formato de aquisição de dados são descritas a seguir. Ambas foram realizadas com o auxílio da equipe do laboratório de geossintéticos – Departamento de Geotecnia – Escola de Engenharia de São Carlos.

a. Acessório de aplicação de carregamento

Como sugerido por França (2012), o equipamento de ensaio confinado-acelerado deveria passar por algumas adaptações para tornar mais simples a aplicação de carregamento. Neste mesmo equipamento Avesani (2013) elaborou um acessório que é capaz de aplicar uniformemente a tensão no corpo de prova, além de tornar constante a velocidade de aplicação do carregamento.

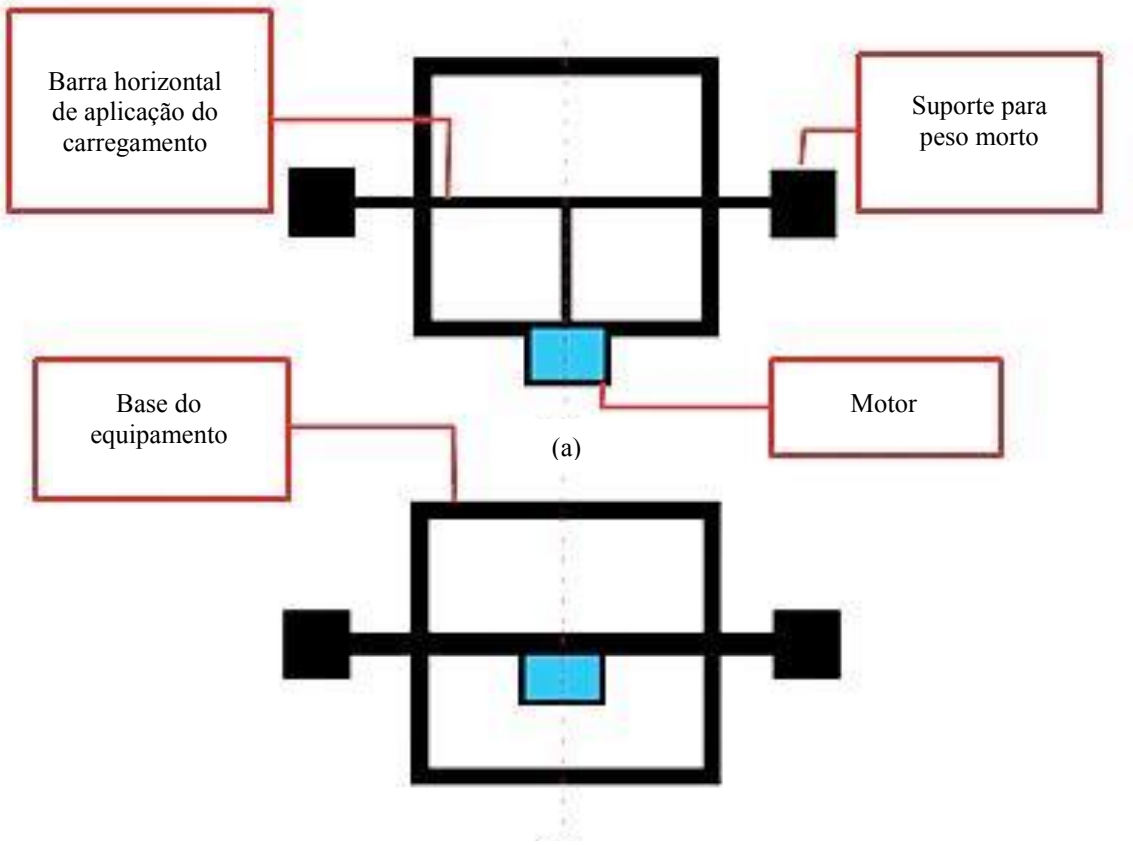
Este acessório passou por algumas modificações neste trabalho com a finalidade de tornar possível a solicitação do geossintético a uma carga mais elevada, necessária para os ensaios de tração. O acessório passou por várias modificações em relação ao reforço da sua estrutura durante os testes. A primeira modificação foi executada no eixo de movimento vertical. Nos ensaios de Avesani (2013), o acessório de aplicação de carga foi configurado de forma que o seu transporte e sua montagem ocorressem facilmente. Portanto, devido à altura da estrutura, a haste vertical, onde é efetuado o movimento de subida e descida do carregamento, se encontrava na extremidade externa do acessório, de maneira que, quando fosse posicionada, ficaria externa ao equipamento de ensaio.

Nesse formato, o acessório possuía um braço que sustentava a barra principal de carregamento, com o fato da carga utilizada em ensaios de fluência ser menor do que a utilizada em ensaios de tração, o braço não influenciava no andamento dos ensaios que anteriormente foram realizados no equipamento. Nos ensaios de tração, o aumento da quantidade de peso morto fez com que este braço sofresse um movimento em seu eixo, o que dificultou a aplicação de carga e a tomada de velocidade. Assim sendo, o eixo vertical foi realocado no acessório, da lateral passou para o centro, fazendo com que a barra de aplicação de carregamento fosse ligada diretamente a haste vertical, excluindo o braço de alavanca do sistema.

Isso fez com que o acessório se tornasse um aparelho fixo ao equipamento, sendo montado sob a mesa de ensaios. Outra modificação realizada no acessório foi o reforço da barra de carregamento para que esta pudesse sustentar cargas maiores. Com a aplicação constante de carregamentos mais elevados no material, ocorreu o envergamento da barra de suporte das cargas, portanto, a barra foi substituída por uma

de maior resistência aos esforços. Na Figura 23 verifica-se a modificação do posicionamento do motor, destacado em azul. Com essa alteração, o braço de alavanca foi excluído do sistema.

Figura 23 - Vista em planta do posicionamento do motor. (a) configuração original, nas barras externas localizada na parte frontal do equipamento. (b) Modificação, motor localizado no centro da mesa do acessório, barras reforçadas para suporte do carregamento.



Fonte: Próprio autor.

b. Aquisição de dados por imagem

Para a segunda bateria de ensaios, uma nova forma de aquisição de dados foi elaborada. Para ensaios de tração não confinados onde o equipamento de ensaio confinado-aquecido pode ser utilizado sem a presença da tampa de travamento, um equipamento para filmagem do ensaio foi elaborado com a finalidade de observar o comportamento do corpo de prova durante o ensaio de tração e, com o auxilio de um programa computacional, é possível analisar a deformação que ocorre no material e como se propaga essa deformação. A estrutura de filmagem consiste em um tripé

regulável tradicional e um braço para fixação do equipamento de filmagem foi adaptado para o encaixe na posição horizontal correta. Este braço permite que a câmara de filmagem alcance o material disposto no equipamento. A filmagem ocorre na horizontal, paralelamente ao corpo de prova, isto é possível de se verificar devido ao nível acoplado na estrutura do tripé, detalhado na Figura 24.

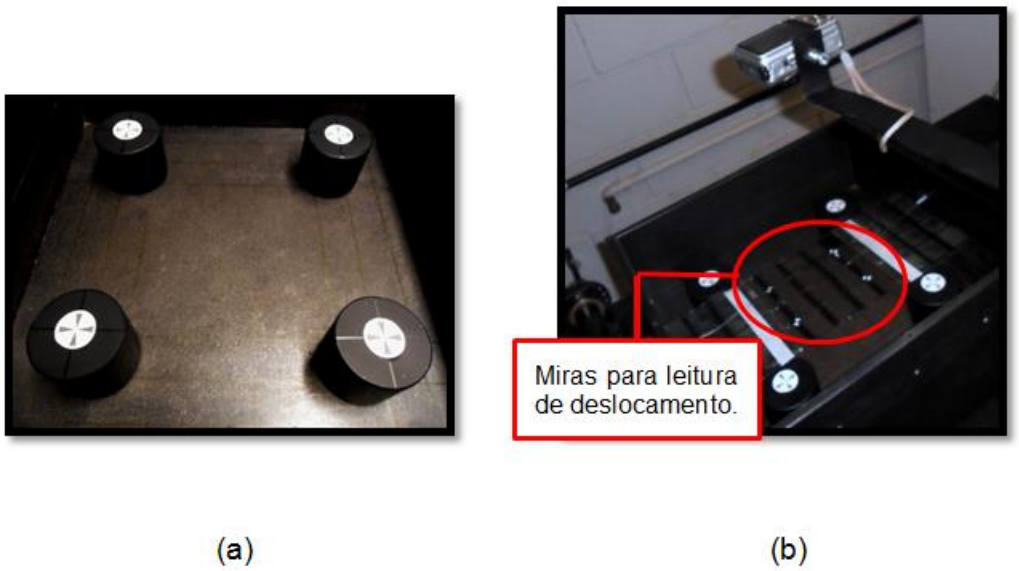
Figura 24 - Estrutura de filmagem.

Fonte: Próprio autor.

As leituras dos deslocamentos foram feitas com o auxílio de miras, onde quatro pontos eram inseridos no corpo de prova, chamados de pontos móveis, e outros quatro eram posicionados na caixa de ensaio, sendo esses os pontos fixos. Com o auxílio do programa computacional é verificada a progressão dos pontos móveis comparados aos fixos em um intervalo de tempo estipulado, obtendo assim o deslocamento do corpo de prova. A princípio os pontos fixos eram inseridos diretamente na caixa de ensaio, essa posição não era muito indicada, pois poderia haver interferência da angulação existente entre as miras do corpo de prova e as da caixa de ensaio. Posteriormente, foram utilizados tarugos adaptados que elevaram a posição das miras e esses fizeram que o ângulo diminuísse e se tornasse desprezível para os cálculos de deslocamento, além de

facilitarem na leitura dos pontos. A Figura 25 ilustra o posicionamento das miras fixas e móveis.

Figura 25 - Miras para leitura de deslocamento. (a) Pontos fixos em tarugos, (b) pontos no corpo de prova (em detalhe).



Fonte: Próprio autor.

4.2 Geossintético

O material escolhido para os ensaios foi uma geogrelha biaxial composta por núcleo de poliéster (PET) e cobertura polimérica de proteção de policloreto de vinila (PVC) – Figura 26. As geogrelhas são materiais muito utilizados em obras de reforço de solo por apresentarem elevada resistência à tração. A deformação desses geossintéticos está relacionada aos tipos de filamentos utilizados em sua fabricação. Apresenta uma sensibilidade reduzida em relação à fluência do material e as suas deformações variam entre valores próximos a 10 e 25% em ensaios de resistência à tração.

Figura 26 - Geogrelha biaxial composta por núcleo de poliéster (PET) e cobertura polimérica de proteção de policloreto de vinila (PVC).

Fonte: próprio autor

Foram conduzidos nas geogrelhas ensaios de resistência à tração, normalizados pela ASTM D 6637, utilizando uma máquina universal de ensaios fabricada pela *Instron Corporation* (capacidade de 250 kN em ensaios de tração e compressão). Outras caracterizações dos materiais também foram estabelecidas e os resultados estão expostos na Tabela 3.

Tabela 3 - Caracterização da geogrelha.

Características	Geogrelha biaxial
Processo de fabricação	Tecida
Polímero predominante	Poliéster
Tamanho de abertura (mm)	35,0
Direção do ensaio	Longitudinal
Resistência à tração (kN/m)	19,72 (1,9%)*
Deformação na ruptura	9,6 (4,4%)*
(*) Valor entre parênteses representa o coeficiente de variação.	

Fonte: Avesani (2013).

4.3 Material confinante

O meio confinante escolhido para a realização dos trabalhos foi a areia. Esta foi escolhida por dois fatores, o primeiro é devido à resistência ao cisalhamento da areia ser independente da temperatura, o outro motivo também está relacionado à temperatura do ensaio e leva em consideração a umidade do meio confinante. Outros solos, para serem

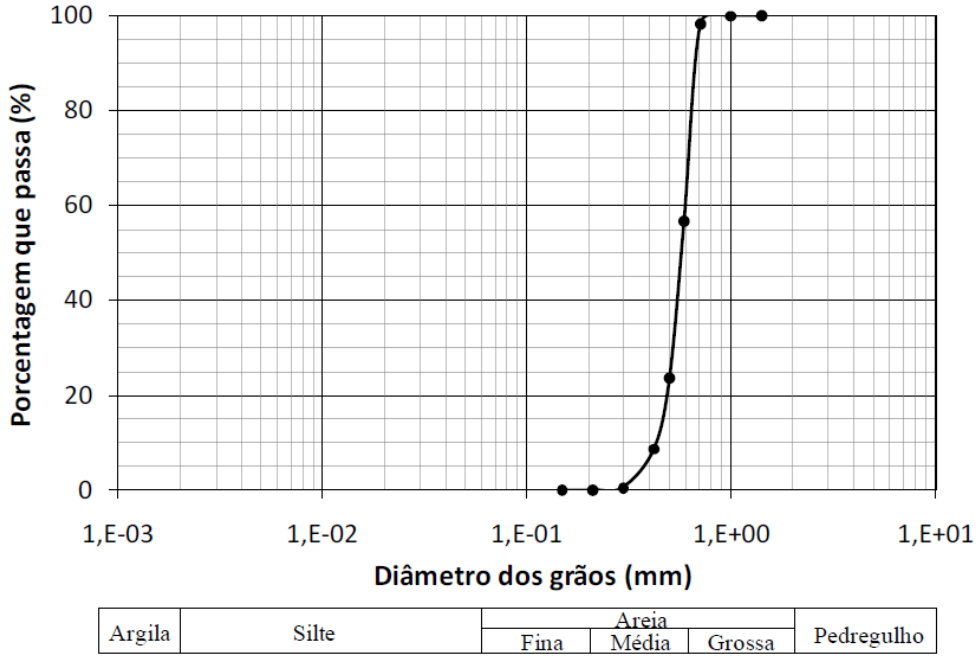
utilizados nos ensaios, deveriam passar por um processo de compactação onde se torna imprescindível a presença de certo teor de umidade, o acréscimo de temperatura na realização dos ensaios afetaria as propriedades do solo em relação a essa compactação. A areia utilizada para os ensaios vem de uma jazida localizada na cidade de Descalvado – SP e tem como características ser uma areia de mineração e mal graduada. Para caracterização da areia foram realizados ensaios de análise granulométrica (ABNT NBR 7181), massa específica (ABNT NBR 6508), índices de vazios máximo (ABNT NBR 12004) e mínimo (ABNT NBR 12051) e o ensaio de cisalhamento direto (ASTM D 3080). Detalhes sobre os ensaios descritos na Tabela 4, e curva granulométrica na Figura 27.

Tabela 4 - Característica do solo confinante - areia média a grossa.

Propriedade	Solo
Peso específico dos sólidos (kN/m³)	26,7
Índice de vazios máximo	0,75
Índice de vazios mínimo	0,57
Peso específico seco máximo (kN/m³)	17,0
Teor de umidade (%)	0
Fração de areia (%)	100
Fração de silte (%)	0
Fração de argila (%)	0
Classificação SUCS	SP
Ângulo de atrito interno (°)	34,5 (D_r= 45%)
Intercepto coesivo (kPa)	0
Coeficiente de empuxo no repouso	0,42

Fonte: Avesani (2013) e França (2012).

Figura 27 - Curva granulométrica do solo para confinamento.



Fonte: França (2012).

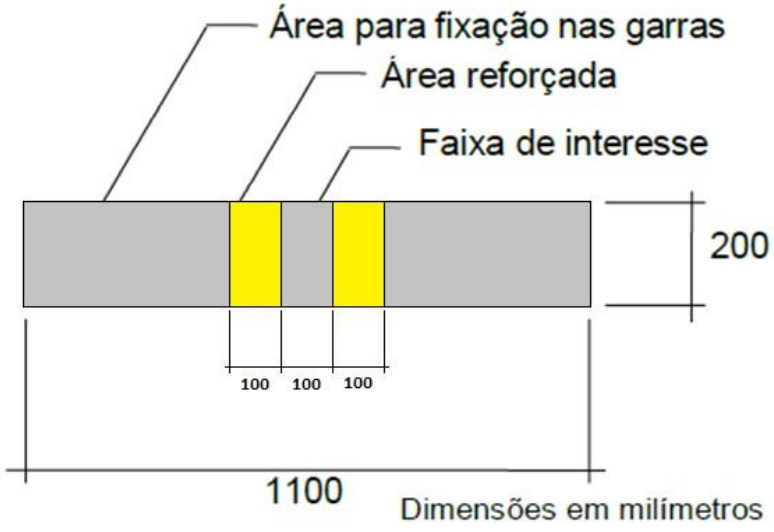
4.4 Configuração dos corpos de prova

Na realização de ensaios no equipamento não convencional, os corpos de prova devem apresentar configurações diferentes em relação aos corpos de prova normalizados para ensaios de tração e fluência. Como apresentado anteriormente, os corpos de prova apresentam dimensões maiores do que os convencionais, e uma área de reforço que tem o propósito de diminuir o atrito com o meio confinante e minimizar o fenômeno de estricção na região. Para os ensaios deste trabalho, três diferentes formas de corpo de prova foram utilizadas, sendo uma convencional e duas modificadas, isso foi necessário para que se pudesse observar o comportamento do material no equipamento em situações distintas.

A primeira conformação apresenta as dimensões de 1100 mm de comprimento por 200 mm de largura e não apresenta área de reforço, a segunda equivale aos utilizados em trabalhos anteriores, como França (2012) e Avesani (2013), com a área de reforço sendo 300 mm de comprimento por 200 mm de largura. A terceira configuração é chamada de corpo de prova com área de reforço reduzida, detalhada na Figura 28. A redução da área de reforço foi realizada para evitar o espaçamento que essa originava entre o corpo de prova e a garra rolete. O espaçamento ocorria devido ao fato dessa área

do corpo de prova ser enrijecida e apresentar difícil manuseio e assim provocando a modificação no comportamento do gráfico.

Figura 28 - Configuração do corpo de prova com área reforçada reduzida.

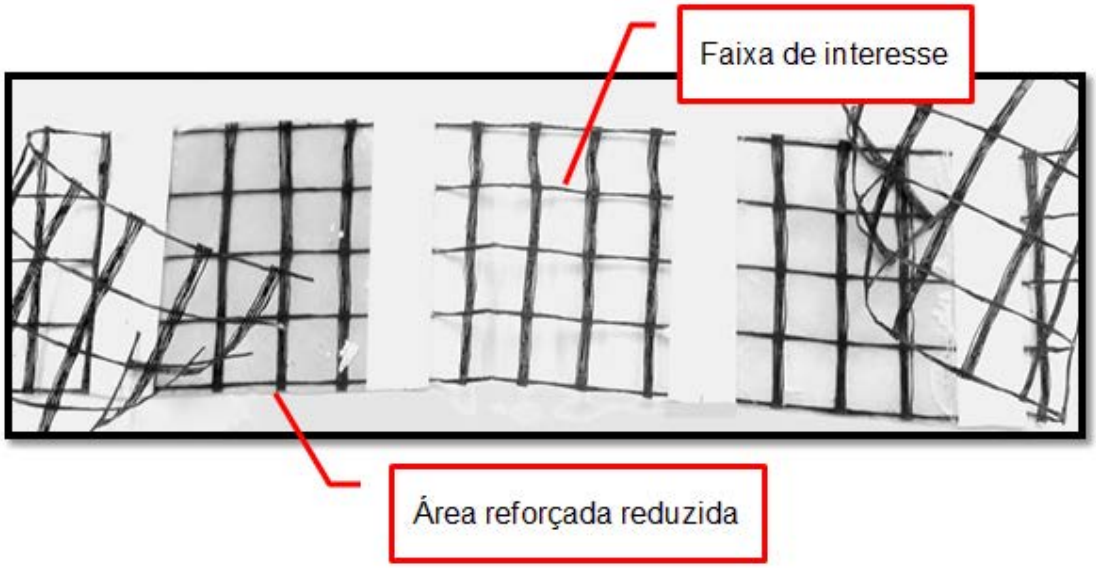


Fonte: França (2012).

Para realização da área reforçada no corpo de prova fixam-se, com fitas adesivas, folhas de poliéster 0,075 mm nas regiões de interesse, em uma face do material, após essa etapa, aplica-se o adesivo bicomponente à base de resina epóxi (secagem 90 minutos, cura 24 horas) no geossintético, tendo a folha como base. Para finalizar o reforço, novamente uma folha de poliéster é colocada na outra face do conjunto, fazendo que o adesivo e o material fiquem entre as folhas. Na fase de cura do reforço, os corpos de prova são distribuídos na horizontal e é realizada a prensa deste por meio de pesos mortos posicionados a cima de suas zonas de reforço, esse procedimento tem o objetivo de minimizar a formação de bolhas de ar no reforço. Com a secagem do conjunto após 24 horas, os fios de aço inextensíveis são amarrados na região central da área de interesse com aproximadamente 100 mm entre eles, aplicando uma cola bicomponente à base de resina epóxi (secagem 10 minutos, cura 24 horas) nos pontos de amarração. Em ensaios que a configuração do corpo de prova não apresenta reforço, somente é realizada a fixação do fio de aço inextensível.

A Figura 29 mostra um corpo de prova com área reforçada reduzida e detalha as suas diferentes áreas.

Figura 29 - Corpo de prova com área reforçada reduzida.



Fonte: próprio autor.

4.5 Ensaios realizados

Diferentes tipos de testes foram executados com o intuito de configurar uma adaptação adequada do equipamento para ensaios de resistência à tração. Os ensaios conduzidos nos geossintéticos foram: ensaio de resistência à tração em temperatura ambiente e corpo de prova isolado, ensaio aquecido com temperatura a 36°C, ensaio aquecido com temperatura a 48°C, ensaio confinado, ensaio confinado-aquecido. Também se realizaram ensaios com diferentes configurações de corpos de prova e formatos de aquisição de dados.

4.1.1 Montagem dos ensaios

Os ensaios realizados serão descritos nos itens a seguir de acordo com o formato de aquisição de dados de cada ensaio. A primeira bateria de ensaios foi realizada com o auxilio de LVDTs e na segunda bateria de ensaios foi utilizado o novo formato de aquisição de dados em conjunto com os LVDTs com o propósito de comparar as informações.

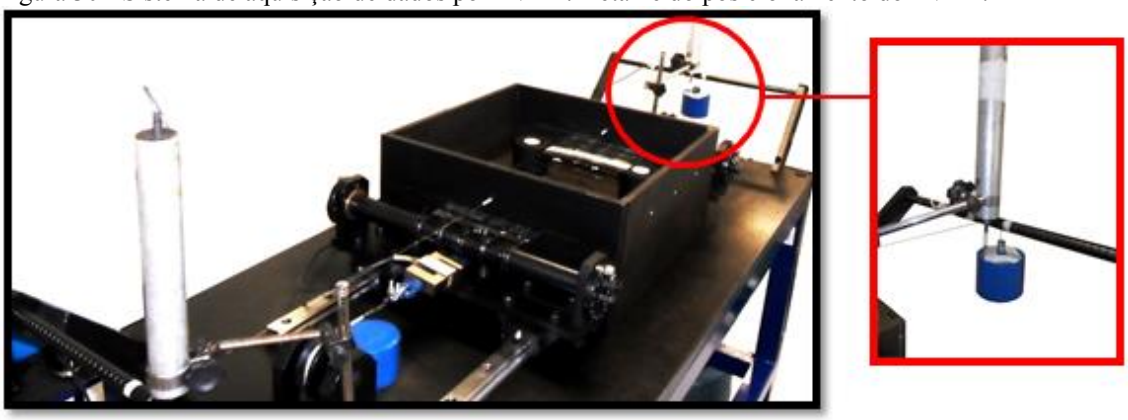
a. Ensaios com aquisição de dados por LVDTs

Os ensaios que apresentam maior complexidade em sua montagem são os ensaios confinados e confinados-aquecidos. O procedimento de confinamento se inicia com o preenchimento da câmara de ensaio em duas etapas. Na primeira o solo é lançado na câmara até que ele se encontre na altura da fresta lateral. Para ser realizada a segunda etapa, primeiramente é necessário que se disponha o corpo de prova no equipamento, assim, geomembranas lubrificadas são posicionadas na parte inferior e superior das regiões reforçadas do corpo de prova, e então os fios inextensíveis são posicionados de forma a passarem pelo orifício reservado a eles. Logo após a realização desse procedimento a câmara recebe o segundo passo de preenchimento. Para ensaios com temperatura na segunda fase de preenchimento o solo a ser colocado é dividido em mais duas etapas para que o segundo termopar seja posicionado entre as duas camadas. Concluído o preenchimento, é posicionado o geotêxtil para a proteção da bolsa de ar que vem logo em seguida, lacra-se o sistema com o tampo do equipamento e aplica-se uma pressão (menor que a confinante) na bolsa de ar a fim de que na fixação do corpo de prova a garra, este não se movimente em meio ao solo. Logo então o corpo de prova é fixado às garras do tipo rolete e estas são travadas para evitar pré-carregamento indesejado e a movimentação do material no sistema. Com o término da fixação é aplicada a pressão confinante desejada, no caso deste trabalho a pressão confinante utilizada foi de 50 kPa.

Com o término do posicionamento do corpo de prova, o sistema de leitura de dados começa a ser preparado. Primeiramente os fios de aço inextensível são presos a tarugos, estes auxiliam na captação do movimento de deslocamento do material e são posicionados abaixo dos LVDTs, que transmitem e registram os deslocamentos na base computacional. Sendo ensaio com presença de temperatura, a temperatura a ser aplicada é calculada com o auxílio da tabela 5, de acordo com a temperatura que se deseja no termopar 2. Para que não haja degradação térmica no material, procura-se evitar que a temperatura atinja um patamar mais alto do que o desejado. A aplicação da carga é realizada com o acessório desenvolvido para aplicação de carregamento uniforme. As velocidades de aplicação de carga são ajustadas para que se realizem os ensaios de acordo com as normas ASTM D 6637. A velocidade de aplicação é 10% (±3%) em relação ao comprimento entre garras do corpo de prova por minuto. Para obtenção esse

valor, com uma trena mede-se a distância inicial entre os eixos da garra rolete e, após um minuto do instante inicial de aplicação de carga, mede-se novamente a distância entre eixos. Assim obtém-se a velocidade da aplicação que é comparada a norma. A Figura 30 ilustra alguns detalhes da adaptação no modo de aquisição de dados pelo LVDT.

Figura 30 - Sistema de aquisição de dados por LVDT. Detalhe do posicionamento do LVDT.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 5 - Características dos testes realizados para a calibração da temperatura.

Teste	Geossintético	Meio Confinante	N*	ΔT**	Variação de temperatura no termopar 1	Equação de calibração
A	Geotêxtil não tecido	Areia	18	5°C	25 a 110°C	Y = 0,710x + 4,837
B1	Geogrelha	Areia	5	15°C	45 a 105°C	Y = 0,724x + 4,448
B2	Geogrelha	Nenhum (climatizado)	6	15°C	35 a 110°C	Y = 0,716x + 4,516
B3	Geogrelha	Nenhum (não climatizado)	6	10 e 15°C	35 a 105°C	Y = 0,716x + 5,0608

(*) Número de estágios;
(**) Incremento da temperatura entre estágios.

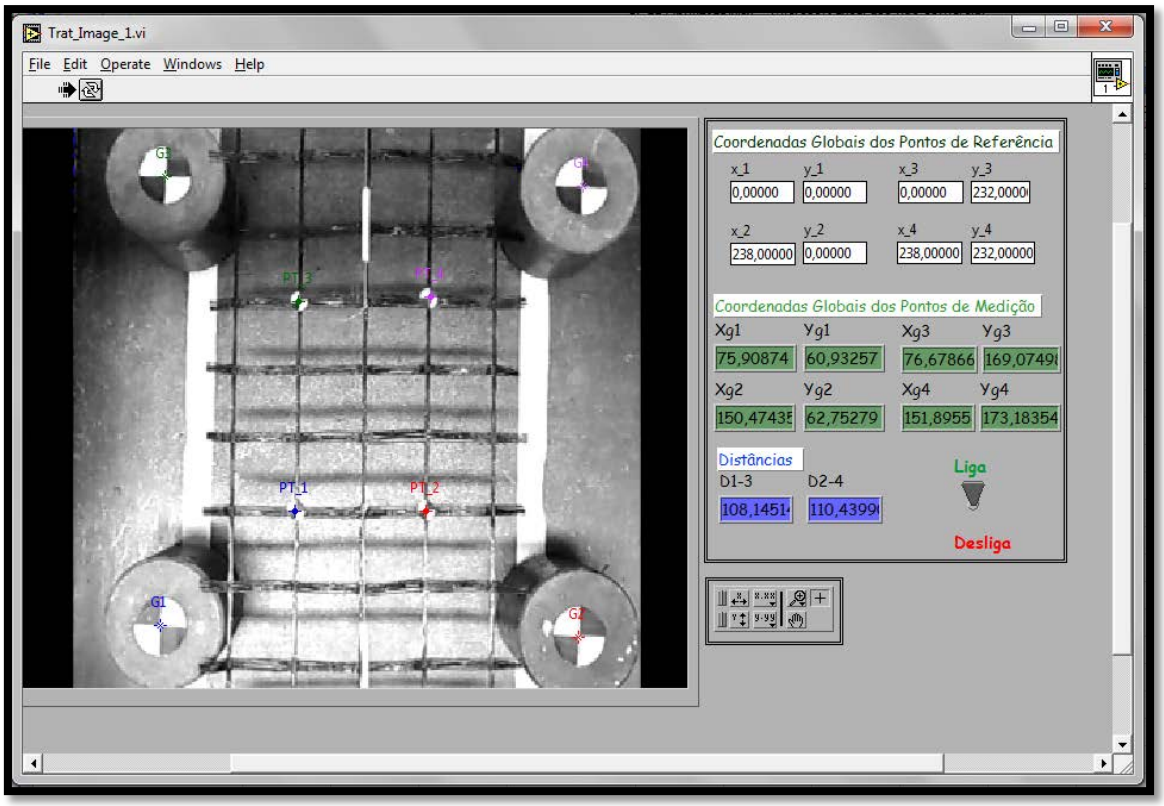
Fonte: França (2012).

b. Ensaios com o novo formato de aquisição de dados

Os ensaios realizados com o novo formato de aquisição de dados por filmagem foram realizados em temperatura ambiente e em isolamento. Para os testes utilizaram-se corpos de prova com área reforçada, área reforçada reduzida e sem área de reforço. Nestes ensaios a montagem do sistema é simplificada. O corpo de prova é posicionado

na horizontal, passando pelas frestas da câmara de ensaio e então as suas extremidades são presas às garras tipo rolete. Os fios de aço inextensíveis passam pelos orifícios das laterais, logo acima das frestas, e são fixados nos tarugos, onde haverá a aquisição de dados por LVDTs para posterior comparação com os deslocamentos filmados. O sistema de aquisição de dados por filmagem é posicionado de forma a capturar todo o espaço da câmara de ensaios. Dentro da câmara há pontos fixos (mostrados anteriormente) e os pontos móveis são colados no corpo de prova, para auxiliar na aquisição dos dados.

Figura 31 - Programa Tratamento de análise de imagens.



Fonte: Próprio autor.

Após as filmagens, em cada ensaio são separadas 10 imagens, onde se inclui o deslocamento inicial e final do ensaio. As imagens são analisadas em um programa desenvolvido no Departamento de Geotecnia – Escola de Engenharia de São Carlos – Programa *Tratamento*. Após informar as distâncias iniciais entre as miras dos pontos fixos, o programa lê a distância entre as miras dos pontos móveis, assim obtém-se o valor do deslocamento em cada intervalo de tempo – Figura 31.

4.1.2 Nomenclatura dos ensaios

Os ensaios foram separados de acordo com a presença ou não de confinamento, a temperatura atuante no ensaio e o comprimento da área de reforço. A Tabela 7 está relacionada à primeira bateria de ensaios e a Tabela 6 relacionada à segunda bateria.

Tabela 6 - Nomenclatura dos ensaios realizados na segunda bateria – aquisição de dados por LVDT e Imagem.

Segunda Bateria de Ensaios					
Nomenclatura	Ensaio	Velocidade	Confinamento	Temperatura	Tipo do Corpo de Prova
GG201-NC-25-R300	01	5,6 cm/mim	Não Confinado	25°C	R300
GG202-NC-25-R300	02	6,0 cm/mim	Não Confinado	25°C	R300
GG203-NC-25-R300	03	4,4 cm/mim	Não Confinado	25°C	R300
GG204-NC-25-R300	04	5,0 cm/mim	Não Confinado	25°C	R300
GG205-NC-25-R300	05	4,4 cm/mim	Não Confinado	25°C	R300
GG201-NC-25-R100	01	4,2 cm/mim	Não Confinado	25°C	R100
GG202-NC-25-R100	02	4,2 cm/mim	Não Confinado	25°C	R100
GG203-NC-25-R100	03	5,6 cm/mim	Não Confinado	25°C	R100
GG204-NC-25-R100	04	5,0 cm/mim	Não Confinado	25°C	R100
GG205-NC-25-R100	05	6,0 cm/mim	Não Confinado	25°C	R100
GG205-NC-25-SR	01	5,4 cm/mim	Não Confinado	25°C	SR
R300 – Área de reforço convencional – 300x200mm R100 – Área de reforço reduzida – 100x200mm SR – Sem área de reforço					

Fonte: Próprio autor.

Tabela 7 – Nomenclatura dos ensaios realizados na primeira bateria – aquisição de dados por LVDT

Primeira Bateria de Ensaios					
Nomenclatura	Ensaio	Velocidade	Confinamento	Temperatura	Tipo do Corpo de Prova
GG1T1-NC-36-R300	Teste1	SD	Não Confinado	36°C	R300
GG1T2-NC-36-R300	Teste2	SD	Não Confinado	36°C	R300
GG1T3-NC-36-R300	Teste3	SD	Não Confinado	36°C	R300
GG101-NC-36-R300	01	SD	Não Confinado	36°C	R300
GG102-NC-36-R300	02	SD	Não Confinado	36°C	R300
GG103-NC-36-R300	03	2,0 cm/mim	Não Confinado	36°C	R300
GG104-NC-36-R300	04	3,0 cm/mim	Não Confinado	36°C	R300
GG105-NC-36-R300	05	2,8 cm/mim	Não Confinado	36°C	R300
GG101-C-25-R300	01	1,7 cm/mim	Confinado	25°C	R300
GG102-C-25-R300	02	4,0 cm/mim	Confinado	25°C	R300
GG103-C-25-R300	03	4,1 cm/mim	Confinado	25°C	R300
GG104-C-25-R300	04	4,4 cm/mim	Confinado	25°C	R300
GG105-C-25-R300	05	3,5 cm/mim	Confinado	25°C	R300
GG101-NC-48-R300	01	4,5 cm/mim	Não Confinado	48°C	R300
GG102-NC-48-R300	02	3,5 cm/mim	Não Confinado	48°C	R300
GG103-NC-48-R300	03	4,5 cm/mim	Não Confinado	48°C	R300
GG104-NC-48-R300	04	4,5 cm/mim	Não Confinado	48°C	R300
GG105-NC-48-R300	05	5,2 cm/mim	Não Confinado	48°C	R300
GG101-C-36-R300	01	1,5 cm/mim	Confinado	36°C	R300
GG102-C-36-R300	02	6,0 cm/mim	Confinado	36°C	R300
GG103-C-36-R300	03	6,2 cm/mim	Confinado	36°C	R300
GG104-C-36-R300	04	4,5 cm/mim	Confinado	36°C	R300
GG105-C-36-R300	05	4,5 cm/mim	Confinado	36°C	R300
GG101-NC-25-R300	01	6,4 cm/mim	Não Confinado	25°C	R300
GG102-NC-25-R300	02	4,8 cm/mim	Não Confinado	25°C	R300
GG103-NC-25-R300	03	4,3 cm/mim	Não Confinado	25°C	R300
GG104-NC-25-R300	04	5,6 cm/mim	Não Confinado	25°C	R300
GG105-NC-25-R300	05	4,8 cm/mim	Não Confinado	25°C	R300
GG106-NC-25-R300	06	4,0 cm/mim	Não Confinado	25°C	R300

R300 – Área de reforço convencional – 300x200mm
R100 – Área de reforço reduzida – 100x200mm
SR – Sem área de reforço
SD – Sem dados

Fonte: Próprio autor.

5 Resultados e discussões

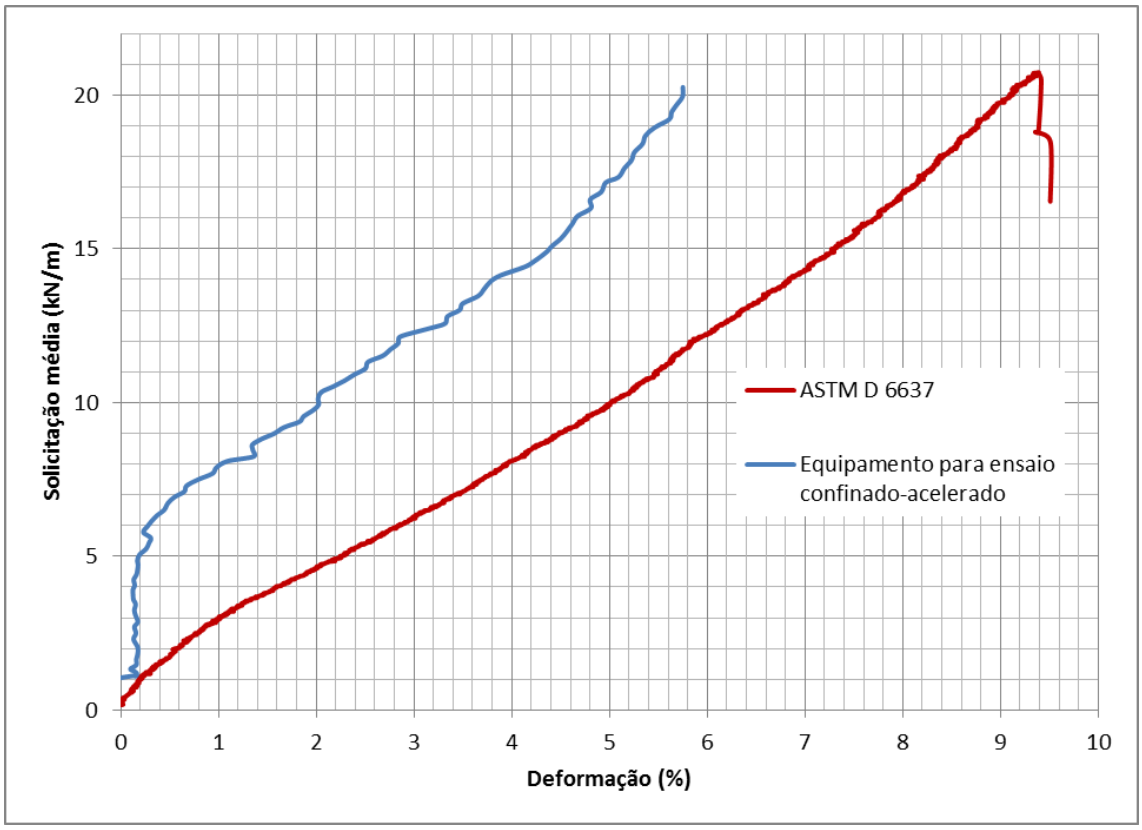
Neste capítulo é analisado o comportamento tensão-deformação do corpo de prova nos diversos ensaios realizados e está dividido em cinco tópicos. A primeira análise é realizada com base na comparação entre o ensaio convencional e o ensaio não convencional de resistência à tração, comparando a presença do meio confinante nos testes. Em seguida são realizadas medições de tensão-deformação em ensaios aquecidos, verificando quais as mudanças que ocorrem com a presença de aquecimento. Também é visto neste capítulo as diferenças entre as ações confinadas e não confinadas, como também o comportamento do material em uma situação confinada aquecida. Finalizando o capítulo com a avaliação dos dados através de imagens, sendo estes colacionados aos dados obtidos pelos sensores de deslocamento.

5.1 Comparação entre ensaio convencional e ensaio não convencional de resistência à tração

Ensaios convencionais de resistência à tração foram conduzidos na máquina universal para a verificação da conduta do material em isolamento. Para conferir este mesmo comportamento no equipamento não convencional, ensaios foram realizados de forma isolada e com o corpo de prova sem a presença da área de reforço. No gráfico da Figura 32 são expostas as curvas obtidas nos ensaios convencionais – ASTM D 6637 – e no ensaio não convencional – equipamento de ensaio confinado-aquecido.

Chama a atenção na curva de tensão-deformação do equipamento não convencional a deformação do material se iniciar próxima ao valor de 5 kN/m da solicitação média. Esse comportamento da curva é referenciado a uma combinação de fatores, um deles é a acomodação do material no equipamento, mesmo corpos de prova que não apresentam área reforçada se reacomodam no equipamento devido ao escorregamento destes na garra rolete quando iniciada a solicitação.

Figura 32 - Curvas do comportamento do corpo de prova em ensaios isolados de resistência à tração e em temperatura ambiente, obtidas pelo ensaio convencional – ASTM D 6637 – e ensaios realizados no equipamento para ensaio confinado-aquecido.



Fonte: Próprio autor.

Outro fato visualizado durante os ensaios foi o tempo que levava para o motor, presente no acessório de carregamento, atingir a velocidade desejada, cerca de 5 segundos, o que representa aproximadamente 8,5% do tempo total de cada ensaio. Ao observar os gráficos de deformação-tempo de cada corpo de prova, verificou-se uma mudança no comportamento da curva próxima ao tempo de 5 segundos, evidenciando a influência da velocidade no comportamento do gráfico.

O posicionamento da célula de carga é outro fator que contribui para a pré-solicitação verificada no comportamento do material no equipamento não convencional. A célula de carga é ligada a garra por meio de um cabo, o mesmo não ocorre em ensaios convencionais onde a célula encontra-se em contato direto com as garras. Portanto, os pesos mortos solicitam o cabo que está ligado à célula de carga e assim a tracionam e ela transfere essa tração para o cabo que está ligado a garra que transfere esse esforço ao material. Esse pequeno instante somado aos outros apresentados anteriormente, além dos pequenos erros e outras acomodações, como as que ocorrem nas roldanas, que por

ventura possam acontecer, fazem com que haja uma redução da deformação do material, caindo de 10% (valor encontrado nos ensaios convencionais) para 6%.

As Tabelas 8 e 9 mostram os coeficientes encontrados para cada curva, nota-se uma tendência dos coeficientes lineares do equipamento não convencional estar acima de 0,5, salve um ensaio, que apesar de apresentar um menor coeficiente linear, proporciona um coeficiente angular acima do esperado. Obtida uma média de 1,96 para os coeficientes angulares das curvas adquiridas na máquina universal e uma média de 2,4 para as curvas do equipamento de ensaio confinado-acelerada (isso se excluir o segundo corpo de prova que apresenta um comportamento diferenciado), observa-se então uma diferença na taxa de deformação devido à mudança de inclinação entre as curvas.

Apesar de o rompimento do material ocorrer em pontos semelhantes (em torno de 20 kN/m) em ambos os equipamentos, a diferença entre eles é notada no comportamento da deformação do geossintético.

Tabela 8 - Equações do gráfico - comportamento do material no equipamento de ensaio confinado-aquecido.

Equações do gráfico			
CP	Equipamento não convencional – Ensaio confinado-acelerado		
	Coef. Angular (Intersecção zero)	Coef. Angular	Coef. Linear
1	3,66	2,30	5,431
2	3,78	3,25	1,9624
3	4,33	2,49	5,968
4	3,70	2,41	5,1684

Fonte: Próprio autor

Tabela 9 - Equações do gráfico - comportamento do material na maquina universal.

CP	Equações do gráfico		
	Equipamento convencional – Ensaio ASTM D 6637		
	Coef. Angular (Intersecção zero)	Coef. Angular	Coef. Linear
1	1,94	1,86	0,5595
2	2,07	1,97	0,6953
3	1,96	1,88	0,5497
4	2,11	2,03	0,5769
5	2,10	2,06	0,2529
6	2,00	1,99	0,22

Fonte: Próprio autor

Resumem-se os resultados dos ensaios de resistência a tração no equipamento convencional e no não convencional, em corpos de prova sem reforço, na Tabela 10. Os carregamentos médios obtidos no equipamento não convencional mostram uma diferença aceitável em comparação aos alcançados pela maquina universal. Porém, em relação à deformação, o resultado adquirido pelo equipamento desenvolvido se mostra bem abaixo do convencional, sendo esta deformação aquém da esperada, encontrada em todos os diferentes ensaios realizados neste equipamento.

Tabela 10 - Resultados gerais dos ensaios de resistência à tração.

Ensaios	Carregamento médio (kN/m)	Deformação média (%)
Equipamento convencional	20,3 (2%)	9,6 (4%)
Equipamento não convencional	19,9 (4%)	5,6 (6%)

Obs.: coeficiente de variação apresentando em parênteses.

Fonte: Próprio autor.

5.2 Ensaios aquecidos de tração não confinada

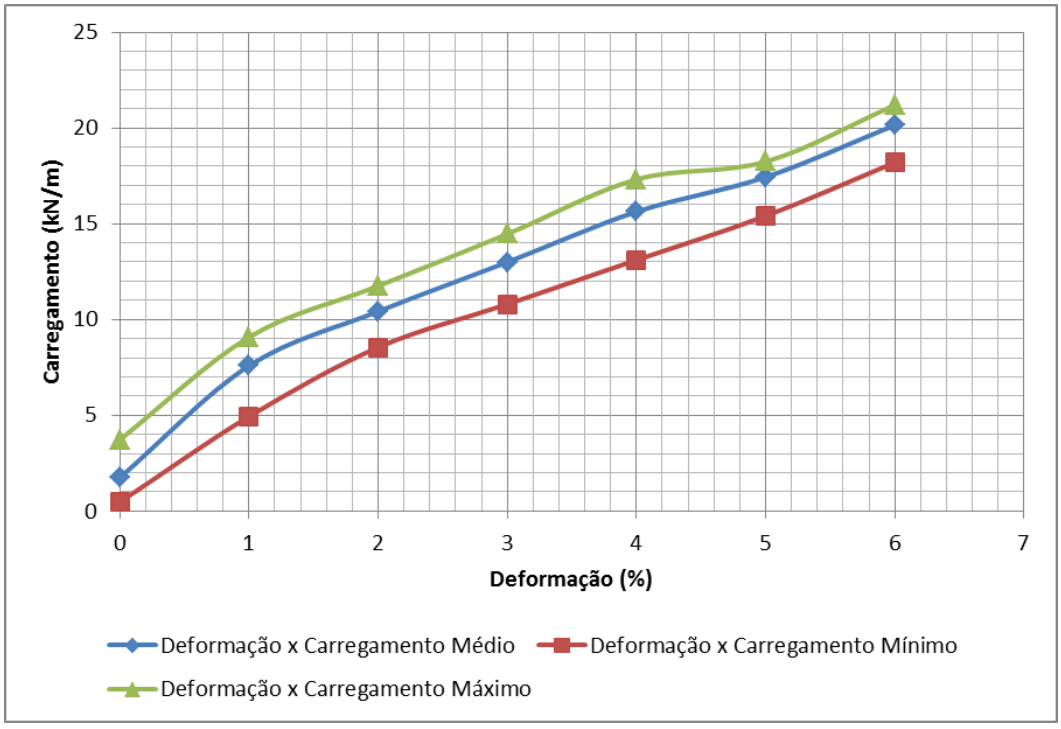
Os ensaios de resistência à tração com a aplicação de calor foram realizados com duas temperaturas distintas: 36 e 48°C. Os materiais foram expostos ao calor em período de tempo diferenciados para verificar se haveria mudança em seu comportamento.

a. Ensaio de tração aquecido a 36°C

Foram realizados oito ensaios aquecidos a 36°C. Os três primeiros corpos de prova analisados serviram para as calibrações do sistema com o desígnio de garantir uma melhor aquisição de dados. Os dados foram analisados de duas formas, a primeira considera as curvas originais geradas pelo equipamento, onde as interferências externas influenciam nos resultados. Já a segunda exclui as interferências iniciais do sistema, assim sendo analisada a verdadeira curva de tensão-deformação do material. São descritas como curvas originais e curvas interpretadas, respectivamente.

Na Figura 33, curva original, observa-se que as curvas apresentam um carregamento inicial diferente de zero. As deformações máximas sofridas pelo material neste equipamento se dão em torno de 6%.

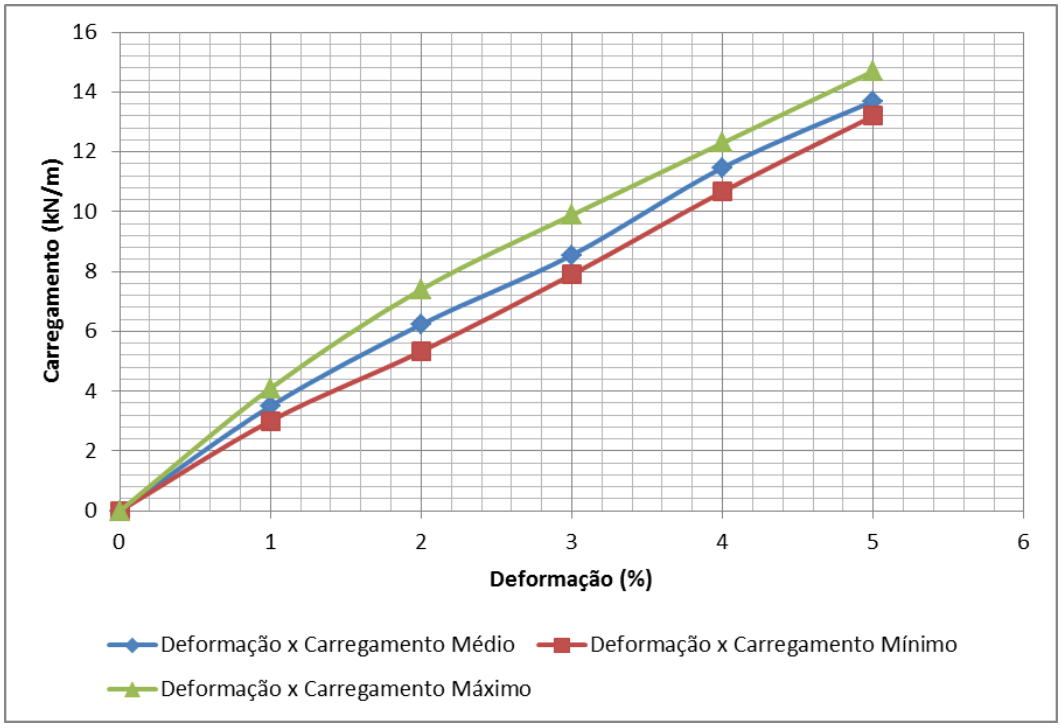
Figura 33 - Curvas originais do comportamento do corpo de prova em ensaios aquecidos de resistência à tração aquecida a 36°C.



Fonte: Próprio autor.

Com as curvas interpretadas, Figura 34, verifica-se que o comportamento dos corpos de prova se apresenta semelhante ao decorrer do ensaio, a partir do ponto que o carregamento e a deformação atuam simultaneamente no corpo de prova.

Figura 34 – Curvas interpretadas do comportamento do corpo de prova em ensaios aquecidos de resistência à tração aquecida a 36°C.



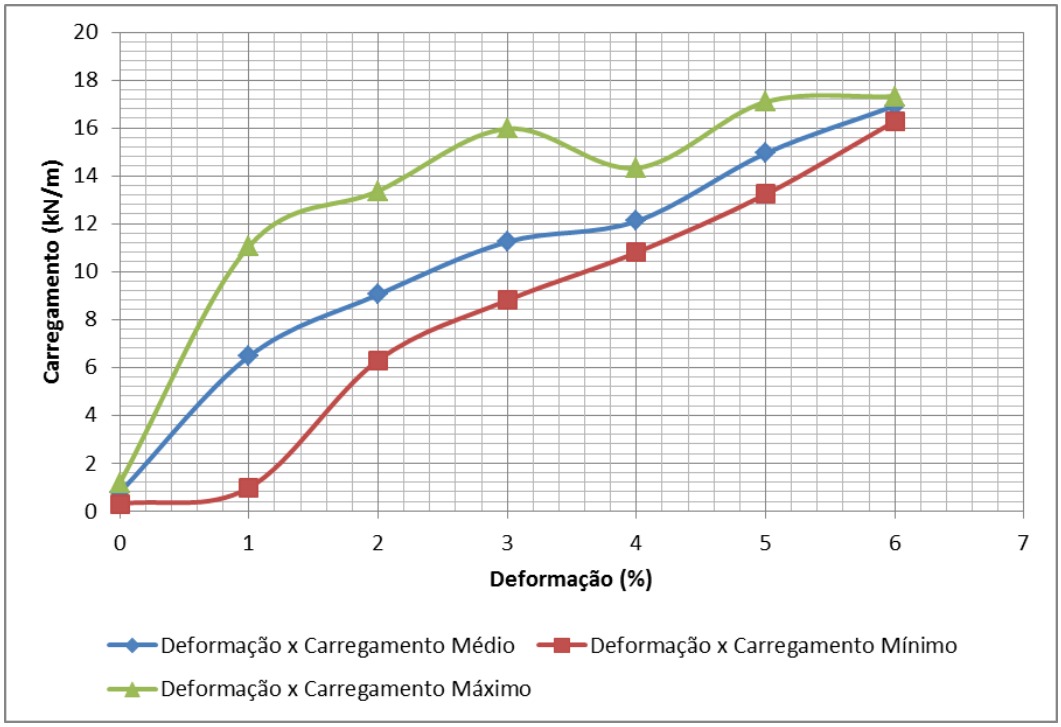
Fonte: Próprio autor.

b. Ensaio de tração aquecido à 48ºC

Foram realizados ensaios aquecidos a 48°C em cinco corpos de prova. Assim como nos ensaios aquecidos a 36°, os ensaios aquecidos a 48° apresentam curvas originais e interpretadas e elas são apresentadas pela Figura 35 e Figura 36, respectivamente.

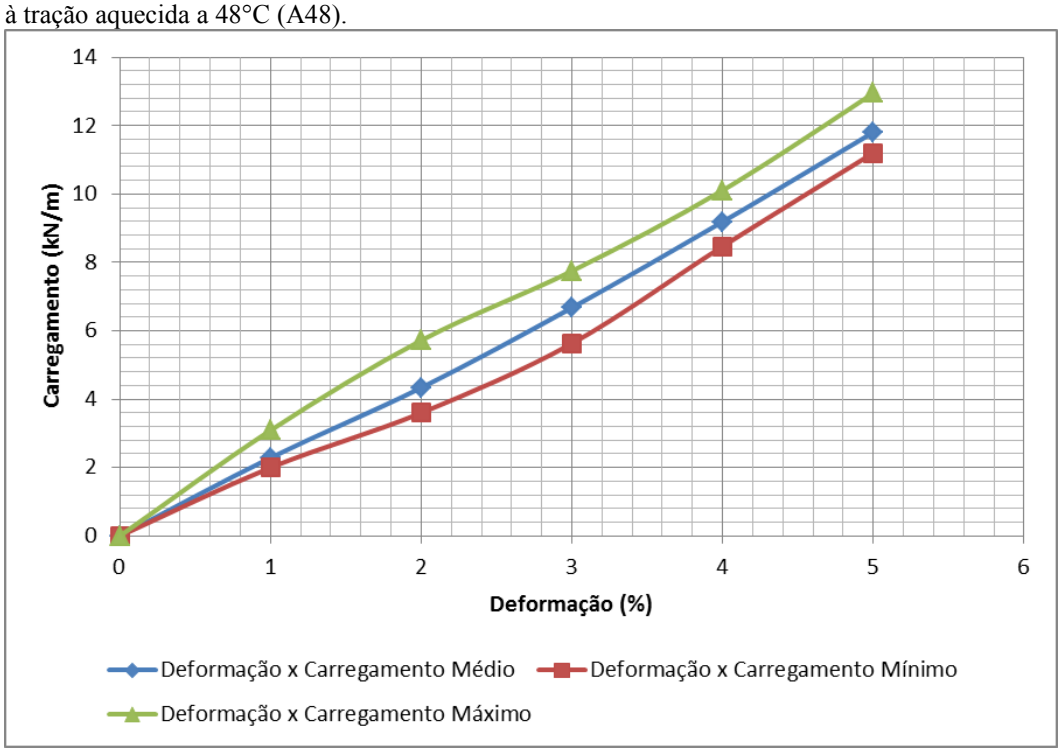
Para chegar à temperatura desejada em um curto espaço de tempo, o aparelho foi configurado para expor o sistema a uma temperatura de 90°C, assim mais rapidamente era alcançada a temperatura desejada de 48°C e, nesse instante, era iniciado o carregamento dos corpos de prova. Atingia-se a temperatura perto de uma hora após o início de cada processo, o que diminuía o tempo de exposição do material a degradação pela temperatura. Alguns corpos de prova apresentaram deformações negativas em seus dados, esse erro foi ocasionado por uma falha no modo de aquisição de dados em conjunto com o mau funcionamento dos sensores de deslocamento. Porém, as trajetórias de suas curvas se mostram semelhantes às das demais. Nas curvas originais de comportamento do ensaio de resistência à tração aquecida a 48° percebe-se uma maior variação deste nos materiais ensaiados.

Figura 35 - Curvas originais do comportamento do corpo de prova em ensaios aquecidos de resistência à tração aquecida a 48°C.



Fonte: Próprio autor.

Figura 36 - Curvas interpretada do comportamento do corpo de prova em ensaios aquecidos de resistência à tração aquecida a 48°C (A48).



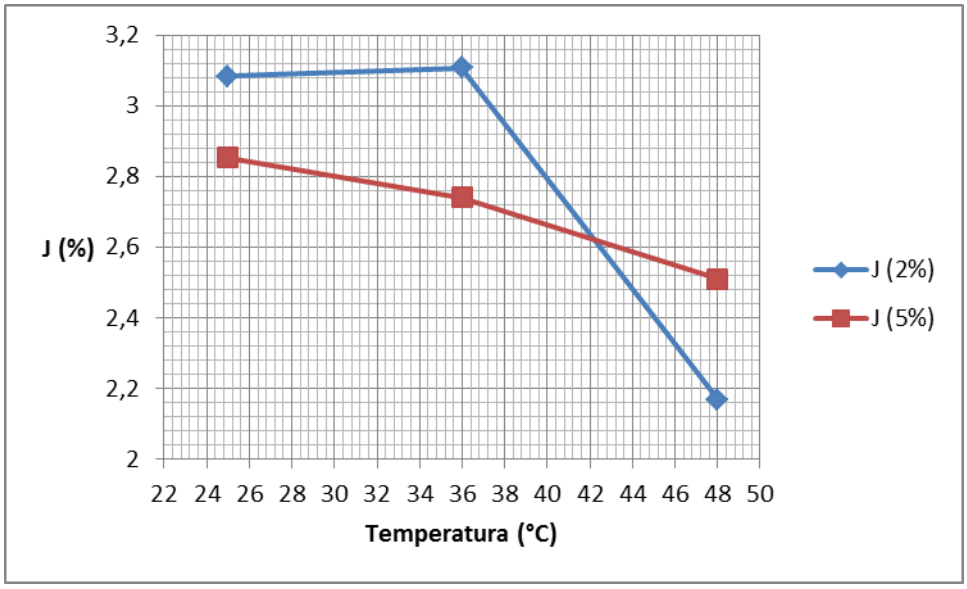
Fonte: Próprio autor.

c. Considerações sobre os ensaios de tração aquecido

Dentre todos os corpos de prova expostos a temperatura, poucos apresentaram resistência próxima a 20 kN/m, que é a resistência associada a este material. A diferença dentre estes e os outros se deu pela variação do tempo de exposição ao calor, em torno de três horas de ensaios para estes corpos que apresentaram maior resistência. Nesse período, a introdução de energia no sistema fez com que houvesse uma remodelagem do material que ajudou em seu processo de deformação, permitindo que o material permanecesse por um período maior em sua fase elástica, rompendo em suas condições ideais. Já em relação aos corpos de provas que foram expostos a altas temperaturas em períodos de tempo próximos de uma hora, pode-se dizer que a entrada de energia ocasionou um enrijecimento na camada externa do material, não alcançando assim o estado de fluência do material interno da estrutura da geogrelha, assim ocorreu uma deformação menor do material e reduziu a resistência do geossintético. Fazendo uma comparação entre as curvas originais e interpretadas, percebe-se uma continuidade nas curvas onde são excluídas as interferências do equipamento. Pode-se verificar portanto um comportamento semelhante aos do equipamento convencional para verificação de resistência à tração, possibilitando entender que o equipamento não convencional proporciona um carregamento necessário a estes materiais.

Entre as variações dos aquecimentos, pode-se verificar que ao ser aquecido a 36º o material apresenta uma menor resistência à carga do que ao ser aquecido a 48º, podendo este comportamento ser explicado da mesma forma anterior. Cada elemento presente na estrutura de geogrelha tem sua fluência e reorganização ocorrendo em fases e em diferentes temperaturas. Vê-se, também, que em ambos os ensaios aquecidos a geogrelha se apresenta menos resistente em relação a ensaios em temperatura ambiente. Conclui-se, então, que o aquecimento gera deterioração no material, podendo ser mais bem examinado em estudos específicos para o caso. Acompanhando a variação do módulo de rigidez, observa-se na Figura 37 a caída do módulo conforme o aumento de temperatura. Sendo nos momentos iniciais encontrada uma maior diferença no comportamento do material exposto a diferentes temperaturas. A temperatura de 48°C faz com que o material apresente comportamentos diversos enquanto são aplicados os esforços. Realçando o fato de o material passar por diferentes fases durante o processo.

Figura 37 - Módulo de rigidez. Comparação entre as diferentes temperaturas propostas.

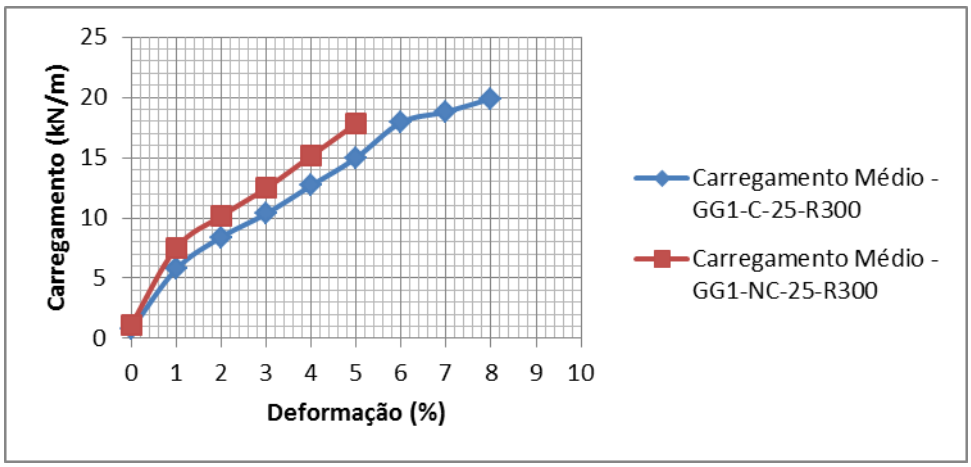


Fonte: próprio autor.

5.3 Tração confinada x tração não confinada

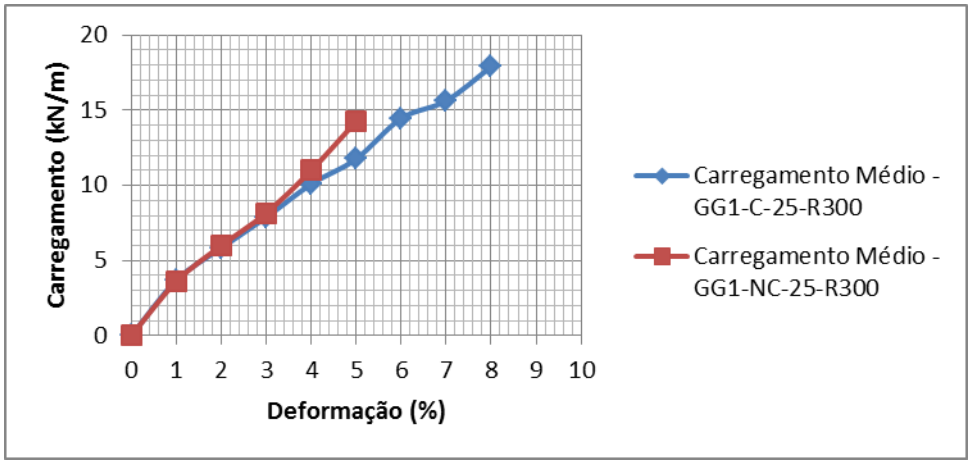
Para a verificação do comportamento do material com e sem confinamento, ambos os ensaios foram realizados com temperatura ambiente de 25°C. Da mesma forma que no item anterior, as curvas são ilustradas de duas formas.

Figura 38 - Curvas originais do comportamento do corpo de prova em ensaios confinados (C) e não confinados (NC).



Fonte: próprio autor

Figura 39 - Curvas interpretadas do comportamento do corpo de prova em ensaios confinados (C) e não confinados (NC).

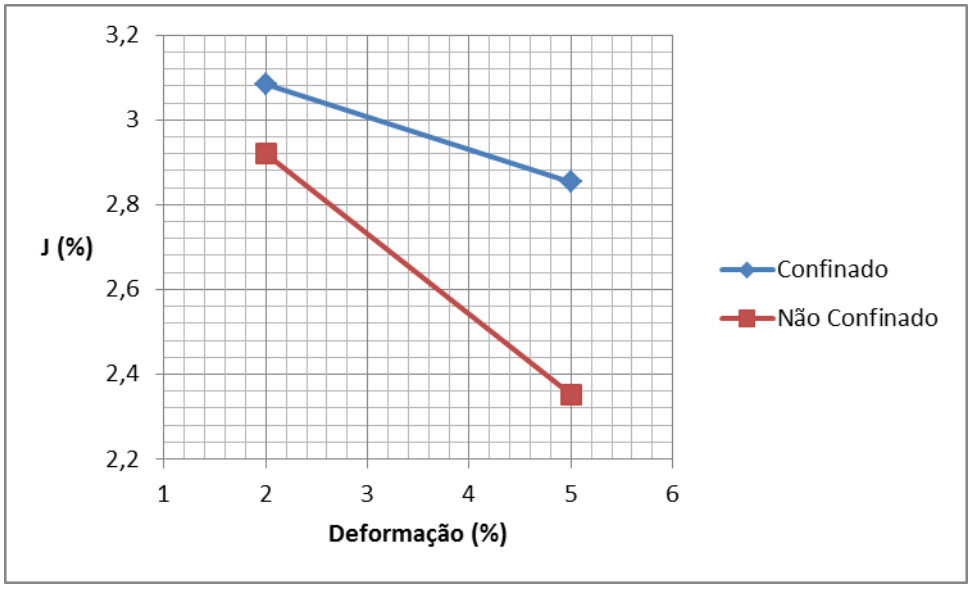


Fonte: próprio autor

Com os gráficos da Figura 38 (curva original) e Figura 39 (curva interpretada) é possível observar os diferentes comportamentos por conta da presença do confinamento. Na curva original, fica mais claro que o material não confinado se rompe com uma menor deformação e uma menor resistência ao cisalhamento em relação ao material confinado. Para melhor explicar esse resultado, é necessária a interpretação da curva, como mostrada na Figura 39. Os materiais confinados e não confinados apresentam comportamento semelhante de tensão/deformação até certo pondo e, a partir deste, seguem em curva distintas. As possibilidades são de que o material até um determinado instante trabalha sem o auxílio do confinamento e quando o solo se envolve no sistema, este conjunto passa apresentar uma maior resistência em relação ao corpo de prova isolado. Outro fato a ser observado nestas duas imagens é em relação ao equipamento. O geossintético isolado sofre maior influencia externa se comparado ao material em confinamento. O confinamento transmite um travamento e uma acomodação melhor ao material, não sendo tão influenciado pelos fatores citados anteriormente, como o afrouxamento na garra rolete.

Nota-se, na Figura 40, um menor módulo de rigidez no material não confinado, este ainda apresenta uma queda mais brusca entre as deformações de 2,0 e 5,0%, indicando que a deformação é atingida em uma carga mais baixa, como apontada nos gráficos anteriores. Porém, o material não confinado apresentou falha precoce nos ensaios, se rompendo antes da deformação esperada.

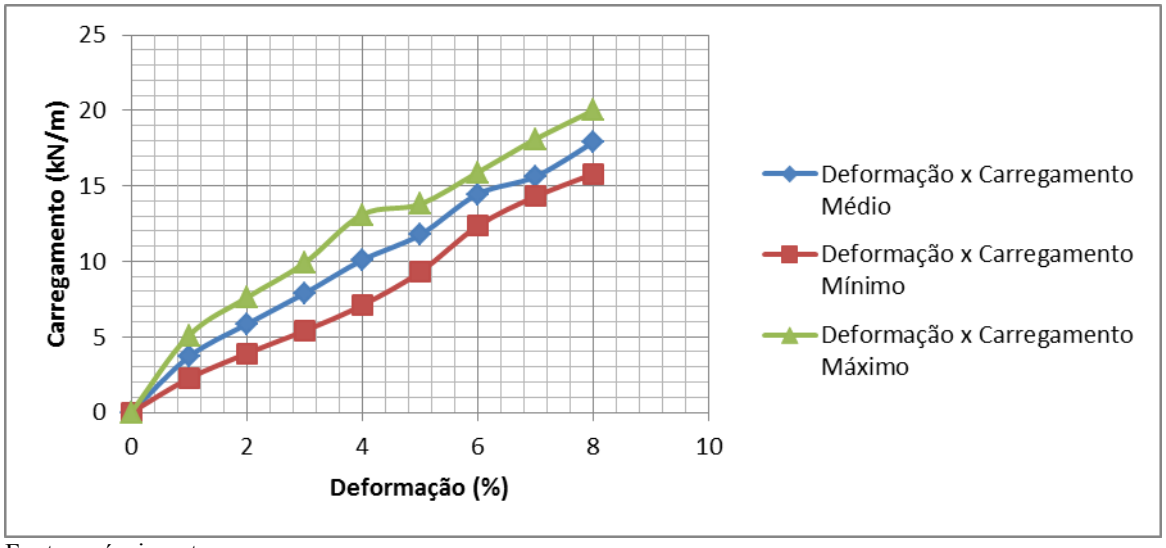
Figura 40 - Módulo de rigidez. Comparação entre o confinamento e o não confinamento.



Fonte: próprio autor

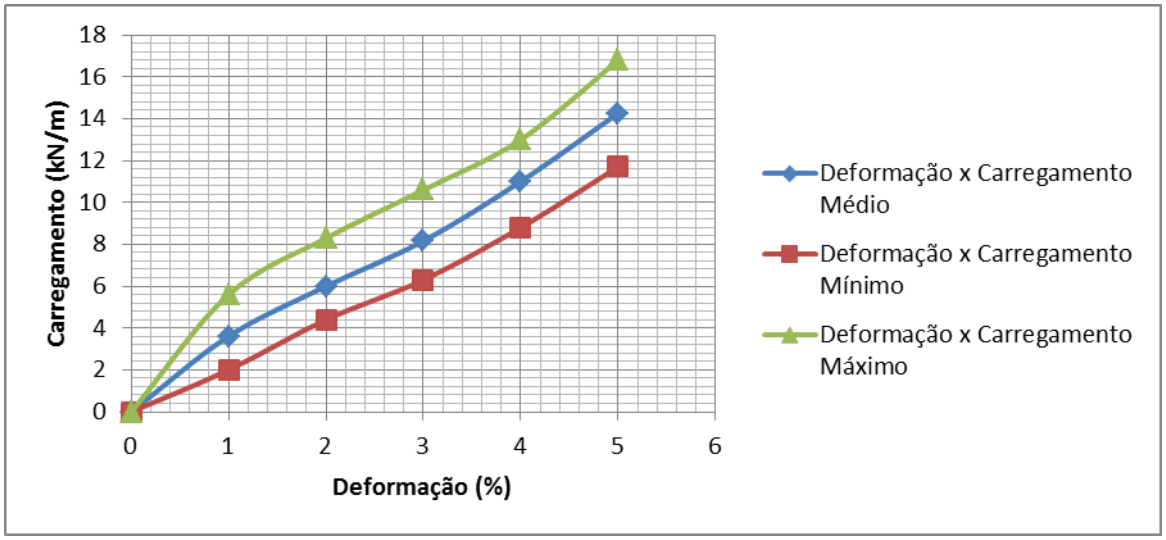
A seguir estão as curvas interpretadas observadas separadamente nas duas situações – confinada (Figura 41) e não confinada (Figura 42).

Figura 41 - Curvas interpretadas do comportamento do corpo de prova em ensaios confinados (C).



Fonte: próprio autor

Figura 42 - Curvas interpretadas do comportamento do corpo de prova em ensaios não confinados (NC).

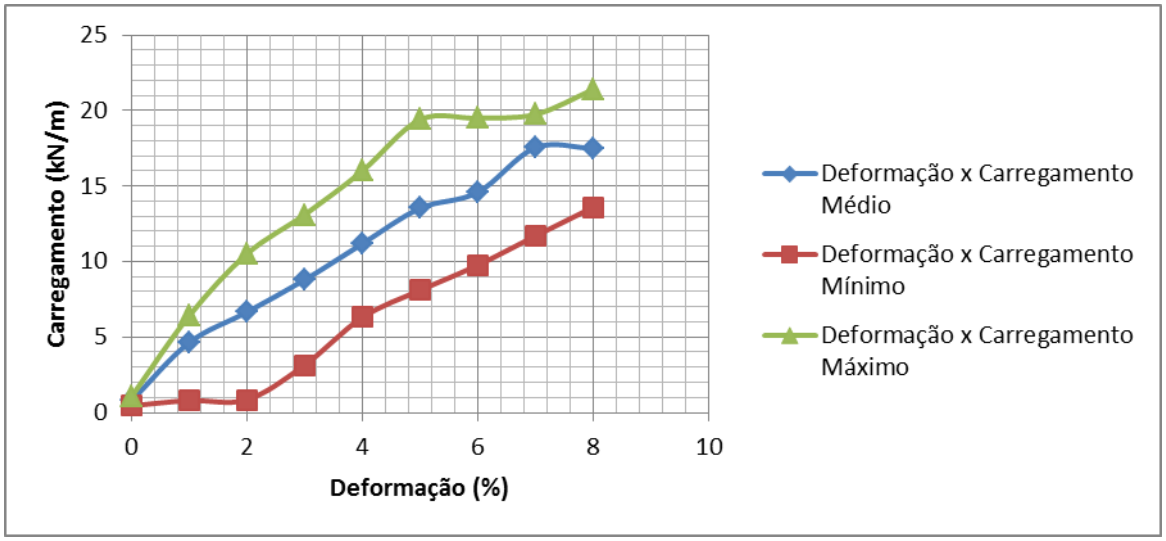


Fonte: próprio autor

5.4 Tração confinada-aquecida

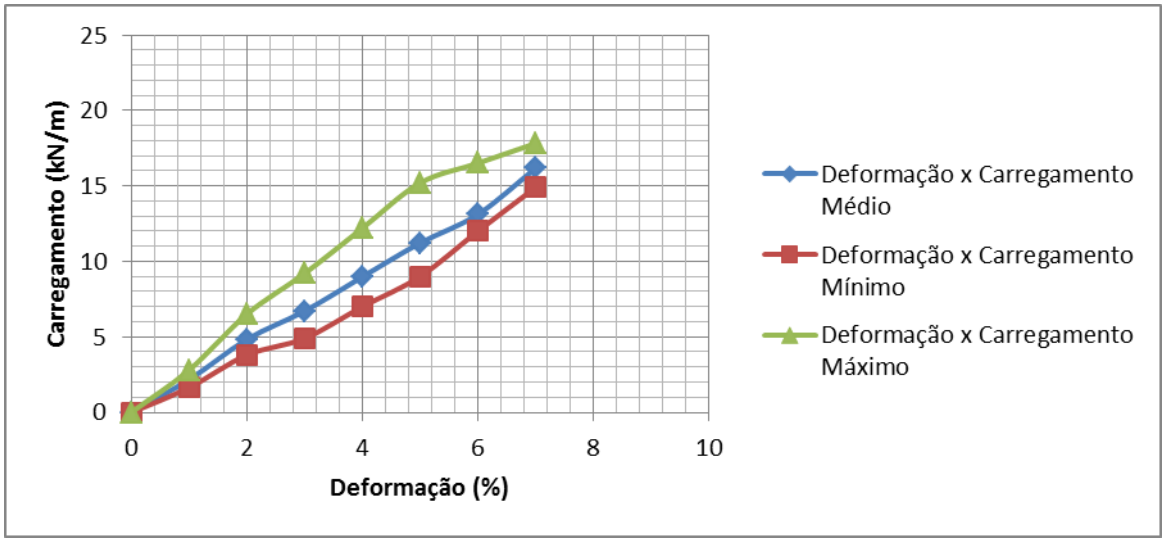
Nesse equipamento, França (2012) e Avesani (2013) já haviam realizado ensaios confinado-acelerados onde solicitavam do material a sua fluência. Para verificar a conduta do material em situação semelhante, a mesma geogrelha utilizada pelos autores citados foi ensaiada em condição confinada-aquecida. Os resultados dos ensaios podem ser verificados nos gráficos da Figura 43 (curva original) e Figura 44 (curva interpretada).

Figura 43 - Curvas originais do comportamento do corpo de prova em ensaios confinados-aquecido.



Fonte: próprio autor

Figura 44 - Curvas interpretadas do comportamento do corpo de prova em ensaios confinados-aquecido.

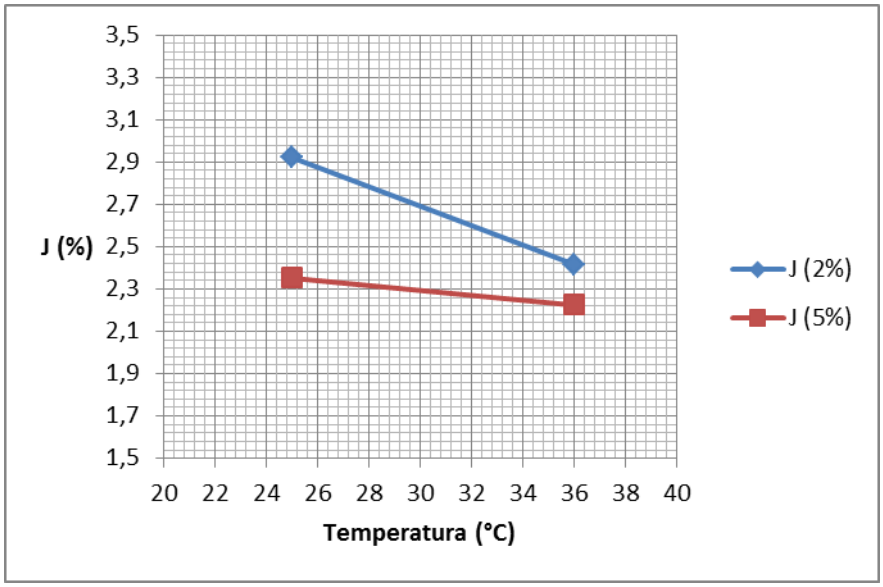


Fonte: próprio autor

Nos gráficos anteriores observam-se desempenhos semelhantes tanto na curva original quanto na curva interpretada. O aquecimento provocou uma melhor conduta do material, fazendo com que este apresentasse uma deformação mais próxima à esperada para esse geossintético – 10,0%.

No gráfico da Figura 45 é dado o módulo de rigidez do material quando exposto ao confinamento e à temperatura. Comparado ao ensaio confinado em temperatura ambiente, quando aquecido a 36°C, o material demonstra uma queda em seu módulo de rigidez. Evidenciando que o acréscimo de calor ao sistema acelera a deformação do material, ou seja, a mesma deformação ocorre com um menor carregamento.

Figura 45 - Módulo de rigidez. Comparação entre o confinamento à temperatura ambiente e o confinamento aquecido a 36°C.



Fonte: próprio autor

5.5 Comparação de LVDT e ADI

Após a primeira bateria de ensaios, que teve a finalidade de adaptar o equipamento para ensaios de resistência à tração, o intuito da segunda bateria de ensaios era visualizar o comportamento do material quando solicitado. Anteriormente se era verificada a deformação de forma pontual no meio da faixa de interesse do geossintético.

Para a aquisição de dados por imagens as miras móveis foram dispostas em elementos cruzados da geogrelha ao lado dos pontos de fixação do fio de aço inextensível, tornando-se possível avaliar uma linha de deformação. Pelas filmagens pode-se perceber que o comportamento da deformação era assimétrico por toda a faixa de interesse do material. Nesta segunda bateria de ensaios, três diferentes configurações de corpos de prova são analisadas quanto ao seu comportamento na câmara de ensaio.

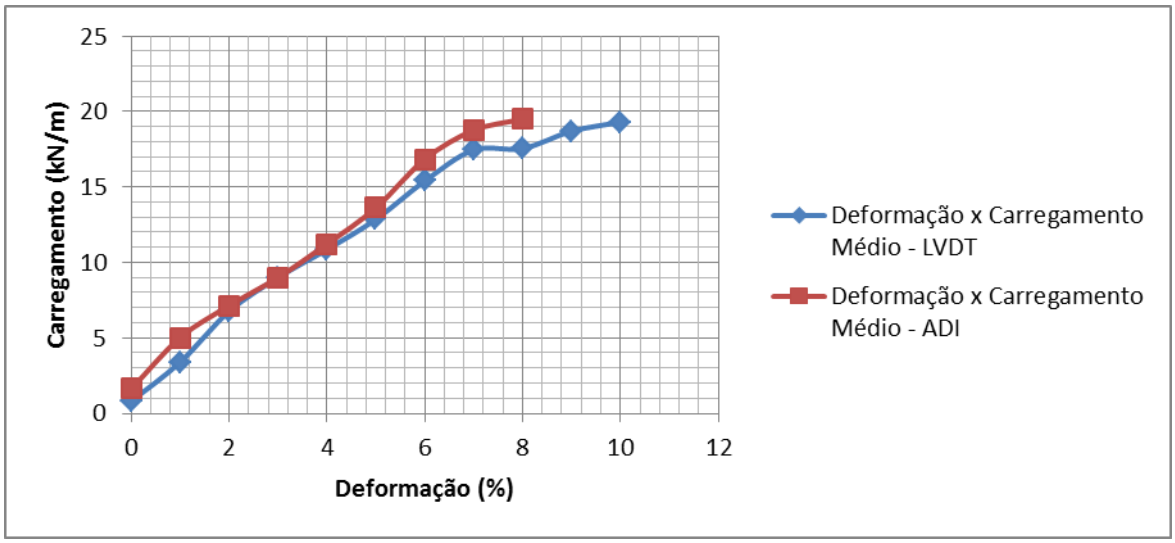
Foram realizados ensaios em corpos de prova com diferentes áreas reforçadas e os resultados são apresentados separadamente nos itens a seguir.

a. Área reforçada de 300 mm.

Cinco ensaios foram realizados com os corpos de prova que apresentam área reforçada de dimensões convencionais. Os dados por imagem e por sensor de deslocamento foram obtidos simultaneamente durantes os ensaios para que se pudesse comparar o comportamento em relação a uma mesma amostra.

As curvas dos gráficos que representam o método de imagens são as médias dos deslocamentos encontrados nos dois pares de miras móveis. Na Figura 46 são apresentados os resultados obtidos para os dois métodos de verificação do deslocamento.

Figura 46 - Curvas originais do comportamento do corpo de prova em ensaios não confinados à temperatura ambiente – área reforçada de 300 mm.



Fonte: próprio autor

Os deslocamentos aferidos pelas imagens mostram uma taxa de deformação inconstante, esse efeito pode ser explicado com base na observação do comportamento do material pelas imagens, as laterais do corpo de prova se deslocam de forma variada e não constante, onde se podia observar, por exemplo, que a mira móvel do canto direito inferior sofria deslocamento e, em outro instante, ela já não era solicitada e a sua estrutura relaxava naquele ponto, e por vezes ate mesmo regredia seu deslocamento.

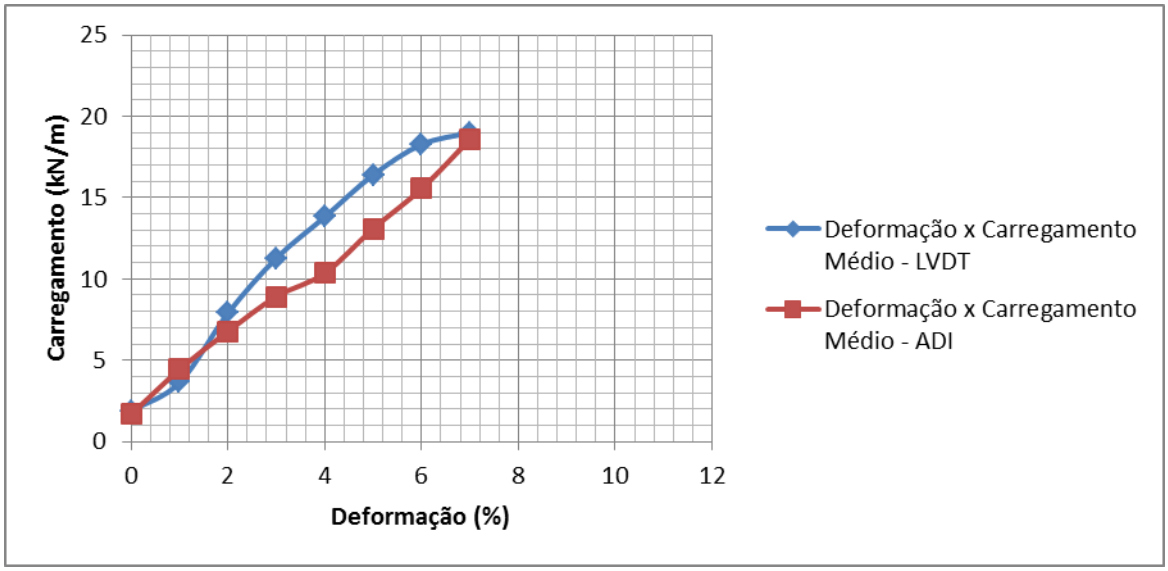
Nas curvas dos dados dos sensores de deslocamento verifica-se um comportamento mais retilíneo, em comparação às obtidas por imagens, devido a uma menor deformação encontrada nos elementos centrais da amostra de geogrelha.

Um fator que se observa nas filmagens é a deformação ocorrendo de forma diferenciada por toda a largura da faixa de interesse do geossintético, o que justifica a incompatibilidade entre os gráficos, também se vê a falha do corpo de prova sucedendo em pontos distintos e lados opostos das laterais da amostra, isto instante antes do rompimento total do material.

b. Área reforçada de 100 mm.

A redução da área de reforço teve o objetivo de acabar com o espaçamento existente entre o corpo de prova e a garra, quando este era enrolado ao redor da garra rolete a região rígida do material deixava algumas folgas que influenciavam nos dados de deslocamento. Cinco ensaios foram realizados com os corpos de prova que apresentam área reforçada de dimensões convencionais. Da mesma forma do item anterior, os dados foram obtidos simultaneamente e são apresentados na Figura 47.

Figura 47 - Curvas originais do comportamento do corpo de prova em ensaios não confinados à temperatura ambiente – área reforçada de 100 mm.



Fonte: próprio autor

As curvas dos gráficos gerados com os ensaios dos corpos de prova com área reforçada reduzida têm a mesma tendência das curvas obtidas com os corpos de prova convencionais. Em relação aos resultados obtidos pelos sensores se apresentarem, em geral, com curvas mais retilíneas comparadas às curvas dos dados de deformação adquiridos pelas imagens.

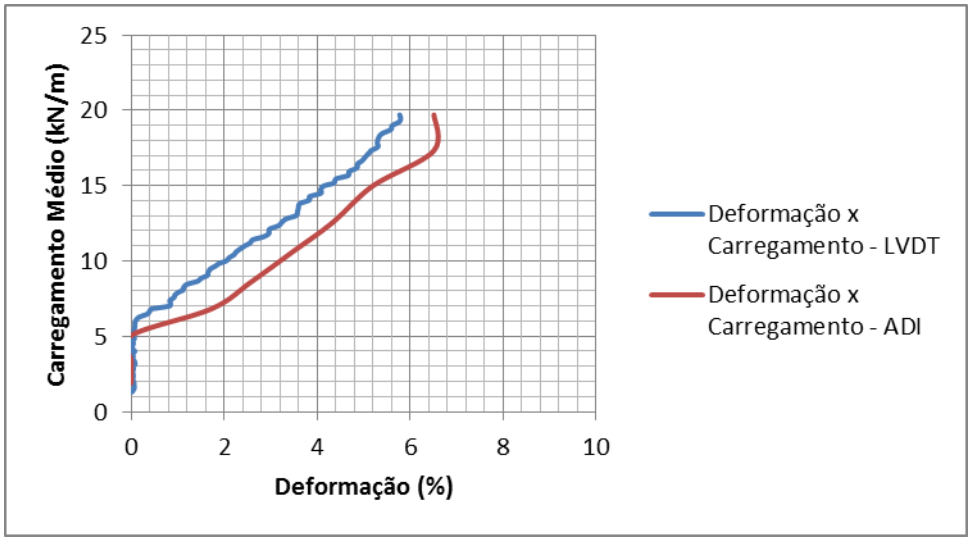
Com relação à área de reforço, a garra e a área reforçada passaram a ter uma distancia entre elas de 3,0 a 4,0 cm, distância suficiente para que o rompimento do corpo de prova ocorresse nesse vão, variando a extremidade em que se rompiam. A região onde ocorreram os rompimentos se apresenta com uma resistência semelhante a faixa de interesse encontrada ao centro da amostra, a diferença é a área de reforço encontrada entre elas.

Ao se deparar com uma estrutura reforçada da geogrelha, o carregamento se concentra na região despreparada para recebê-lo, causando assim sua falha. Mas, mesmo ocorrendo o rompimento fora da área pré-estipulada, houve deformação e falhas na faixa de interesse.

c. Sem área de reforço.

Com o corpo de prova sem área reforçada foi realizado um único ensaio onde se tinha a aquisição de dados tanto por imagem quanto por sensor. O gráfico obtido neste ensaio é representado na Figura 48. O comportamento do geossintético se mostra parecido aos dos materiais reforçados, tendo uma deformação maior nas laterais comparado ao centro do corpo de prova.

Figura 48 - Curvas originais do comportamento do corpo de prova em ensaios não confinados à temperatura ambiente – sem área reforçada.



Fonte: próprio autor

6 Conclusões e sugestões

O presente trabalho propôs realizar adaptações no equipamento de ensaio confinado-aquecido em geossintéticos. O equipamento passou a receber ensaios de tração onde anteriormente eram desenvolvidos ensaios de fluência confinada-acelerada. Reforço na estrutura para aplicação de carga e novos métodos para aquisição de dados foram estudados. A seguir destacam-se as principais conclusões obtidas neste trabalho e são sugeridas novas pesquisas com a finalidade de aperfeiçoar o equipamento.

6.1 Conclusões

a. O equipamento para ensaios de resistência à tração confinada acelerada adaptado de França (2012) e Avesani (2013) mostrou um desempenho satisfatório nas baterias de ensaios.

b. As adaptações realizadas no acessório desenvolvido por Avesani (2013) fizeram com que a aplicação de cargas de valores mais altos fosse possível sem que houvesse influencia considerável da ação do momento na barra principal de carregamento.

c. Registra-se uma maior resistência à tração nos ensaios confinados e confinados-aquecidos em comparação aos ensaios sem a presença de confinamento. Apesar de ser um aumento considerado ínfimo, deve-se ressaltar que as geogrelhas pouco alteram seu comportamento mediante ao confinamento por conta dos espaçamentos existentes entre suas faixas de resistência.

d. Os ensaios realizados em equipamento convencional apresentaram maior deformação em relação aos realizados de forma isolada e a temperatura ambiente no equipamento não convencional estudado neste trabalho.

e. Nos ensaios onde se diferem as configurações das áreas de reforço dos corpos de prova, pouco se altera o comportamento do material. Alerta-se somente quanto às deformações ocasionadas na geogrelha sem reforço que é mais propícia a sofrer influencias externa.

f. As diferenças encontradas dentre as aquisições de dados por sensores e por imagens ocorrem devido ao posicionamento da leitura em cada método, evidenciando um comportamento não linear da deformação.

Considerando os objetivos propostos: o equipamento sofreu alterações onde, com estas, se foi possível realizar ensaios de resistência à tração confinada-aquecida em geossintéticos para reforço. São necessários alguns ajustes para que os resultados de tensão-deformação saiam com gráficos mais limpos, onde seria possível uma melhor interpretação comportamental do material.

Os materiais foram testados em variados formatos e exibiram respostas, do comportamento em relação à resistência à tração, distintas entre si, podendo-se avaliar o equipamento em diferentes situações de ensaio. Na comparação entre os ensaios convencionais e não convencionais, as curvas se mostram com a mesma tendência, porém apresentam menores deformações no equipamento adaptado. Esta situação está relacionada a forma de coleta de dados utilizada neste equipamento, que é uma das propostas sugeridas no item a seguir.

6.2 Sugestões para futuras pesquisas

Com o objetivo de aprimorar o equipamento para realização de ensaio confinado-aquecido, a seguir são indicadas algumas propostas para estudos futuros:

a. A presente pesquisa foi realizada com base em ensaios de resistência a tração em geogrelhas, para obtenção de resultados mais abrangentes sobre o comportamento do equipamento não convencional sugere-se que os mesmos ensaios sejam realizados com amostras de geotêxteis, outro importante geossintético com características de reforço.

b. Aperfeiçoamento do sistema de aquisição de dados por sensores de deslocamento – LVDTs. O posicionamento atual deste sistema sofre influências externas que podem transmitir dados alterados sobre o comportamento do material.

c. O carregamento realizado pelo acessório criado por Avesani (2013) passou por algumas alterações neste trabalho, mas ainda há melhorias a serem realizadas. Uma delas é o aumento da altura da haste vertical do acessório, isso impedirá que o ensaio se finalize por ocorrer o fim de curso do equipamento. Outra alteração necessária é na aplicação de velocidade ao carregamento que leva cerca de cinco segundos para alcançar a velocidade estipulada para o ensaio.

d. Nos ensaios confinados, a montagem e desmontagem do sistema de confinamento ainda é um empecilho, pois nestas atividades se é despendido muito tempo. Uma nova configuração de montagem facilitaria o estudo e permitiria que mais ensaios fossem realizados em um mesmo período de tempo.

Referências

AGUIAR, V. R. *Resistência de interfaces solo-geossintético:* desenvolvimento de equipamento e ensaios. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica, 2008. p. 372.

ALLEN, T. M.; BATHURST, R. J.; HOLTZ, R. D.; WALTERS, D.; LEE, W. F. A new working stress method for prediction of reinforcement loads in geosynthetic walls. *Canadian Geotechnical Journal*, Ottawa, v. 40, n. 5, p. 976-994, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. *ABNT Catálogo*. São Paulo: São Paulo, 2013. Diponível em: < http://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=259786>. Acesso em: 14 ago 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERILAS- ASTM. *ASTM D6637:* 11 standard test method for determining tensile properties of Geogrids by the single or multi-rib tensile method. West Coshohocken, 2001. p. 1-6).

AVESANI, F. P. *Fluência confinada e acelerada em geossintéticos.* São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, 2013. p 134.

BALLENGEER, J. R.; WU, J. T. Intrinsic confined and unconfined load-deformation properties of geotextiles. In: CHENG, S. J. *Geosynthetics soil reinforcement testing procedure.* Philadelphia: San Antonio, p. 16-31, 1993.

BARAS, L. C. *Estudo da fluência em geotêxteis através de ensaios não confinados convencionais e acelerados.* São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, 2001. p.112.

BARBOSA, G. S. *Pavimentos com base reforçada com geogrelha:* análise de resultados. Porto Alegre: Escola de Engenharia - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010. p 45.

BATHURST, R. J. *International Geosynthetics Society- IGS*. Kingston: Ontario, 1999. Disponível em: < <http://www.geosyntheticssociety.org/>. Acesso em: 13 ago 2013, (1999).

BENJAMIM, C. V. *Avaliação experimental de protótipos de estruturas de contenção em solo reforçado com geotêxtil.* São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, 2006. 256 p.

BONAR, B. V. *Roadtraffic technology*. Arnhem: Netherlands, 2013. Disponível em; < http://www.roadtraffic-technology.com>. Acesso em: 3 set. 2013,

BORGES, J. M. *Engehnharia civil*. São Paulo: São Paulo, 2011., Disponível em: < http://www.engenhariacivil.com/reforco-solos-geossinteticos>. Acesso em: 4 set. 2013.

BUENO, B. D. Propriedades, especificações e ensaios. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOSSINTÉTICOS, São José dos Campos.*4º Congresso Brasileiro de Engenharia Ambiental* São José dos Campos: São Paulo, 2003. p. 163-176.

BUENO, B. D.; SILVA, A.; VALENTIN, C. A. Projeto e construção de um sistema para registrar e gerenciar resultados de ensaios de tração em materiais geossintéticos. In: CONGRESSO DE QUALIDADE EM METROLOGIA-ENQUALAB, 2007, São Paulo. São Paulo: *Rede* Metrológica do Estado de São Paulo - REMESP, 2007. p. 8

BUENO, B. D.; VALENTIN, C. A.; MOSSIM, V. Um panorama do desempenho de geossintéticos comercializados no país sob a ótica de ensaios de laboratório. In: SIMPÓSIO BRASILERO DE GEOSSINTÉTICOS, 5., 2007, Lugar de Realização do Evento. *Título...* Lugar de Publicação: Local de edição, 2007. p. 1-8.

CARNEIRO, J. R. *Durabilidade de materiais geossintéticos em estruturas de carácter ambiental:* a importância da incorporação de aditivos químicos. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009. p. 602.

CASTRO, A. T. *Ensaios de rampa e de cisalhamento direto em interfaces solo-geossintético.* Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2008. p. 118.

CASTRO, D. C. *Ensaios de arrancamento de geogrelhas no campo e no laboratório.* Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica, 1999. p. 135.

COMITÊ TÉCNICO DE GEOSSINTÉTICOS. *Geossintéticos*. São Paulo: São Paulo, 2013. Disponível em: < http://www.geossinteticos.org.br/>. Acesso em: 27 ago 2013,

COSTA, C. M. *Fluência em geotêxteis.* São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, 1999. p. 97.

COSTA, C. M. *Deformações dependentes do tempo em muros de solo reforçado com geotêxteis.* São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, 2004. p. 362.

COSTA, C. M.; BUENO, B. S. Fluência em geotêxteis não tecidos. *Solos e Rochas,* São Paulo, v. 23, v. 3, p. 235-246, 2000.

COSTANZI, M. A. *Emprego do método SIM para obtenção das curvas isócronas e de ruptura por fluência.* São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, 2003. p. 95.

ELIAS, V.; YUAN, Z.; ROBERT, H. SWAN, J.; BACHUS, R. C. *Development of protocols for confined extension/creep testing of geosynthetics for highway applications.* Georgetown Pike: Department of Transportation, 1998. p. 203.

EMIC. São Paulo; São Paulo, 2005. Disponível: < http://www.emic.com.br/artigos.php?id_artigo=126&categoria=tecnicos&lang=16>. Acesso em: 14 ago 2013.

FARRAG, K. S. (1997). Development of a accelerated creep testing proceedure for geosynthetics - part I: testing. *Gotechnical Testing Journal*, Lugar de Publicação, v. 20, n. 4, p. 414-422, 1997.

FARRAG, K.; ACAR, Y. B.; JURAN, I. Pull-out resistence of geogrid reinforcements. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 12, p. 133-159, 1993.

FRANÇA, F. A. *Novo equipamento para realização de ensaios confinados e acelerados de fluência em geossintéticos.* São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, 2012. p. 259.

FRANÇA, F. A.; BUENO, B. D.; ZORNBERG, J. G. *Novo equipamento para realização de ensaios de fluência simultaneamente confinados e acelerados.* São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, 2011. p.8.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. *Estudo dos materiais.* Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 2000. p. 320.

HOLTZ, R. D. (1977). Laboratory studies of reinforced earth using a woven polyester fabric. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE USE OF FABRICS IN GEOTECHNICS, 2., Paris, 1977, p. 149-154.

HOULSBY, G. T.; JEWELL, R. A. Design of reinforced unpaved roads for small rut depths . In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOTEXTILES, GEOMEMBRANES AND RELATED PRODUCTS, 4., 1990, Rotterdam., Rotterdam: Den Hoedt, 1990. p. 171-177

JEWELL, R. A. Soil reinforcement with geotextiles. *Special Publication 123, Ciria*, 1996, p. 332.

JEWELL, R. A.; WROTH, C. P. Direct shear test on reinforced sand. *Geotechnique*, Luagar de Publicação, v.7, n. 1-2, p. 81-118, 1987.

JURAN, I.; FARRAG, K. H.; RICHMOND, L. (1991). Short and long term performance of polymeric geogrids. *Proceedings of Geosynthetics*, Atlanta, v. *2*, p. 587-599.

KAMIJI, T. S. *Fluência de geotêxteis não tecidos através de ensaios confinados.* São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, 2006. p. 148.

KOERNER, R. M. *Designing with geosynthetics.* Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2005. p. 796.

LING, H. I.; LIU, H.; MOHRI, Y.; KAWABATA, T. Bounding surface model for geosynthetic reinforcements. *Journal of Engineering Mechanics*, New York, v 127, n 9, p. 963-967, 2001.

LOPES, M. P.; LOPES, M. D. *A durabilidade dos geossintéticos.* Porto: U.Porto Editorial, 2010. .. p.

MCGOWN, A.: ANDRAWES, K. Z.: KABIR, M. H. Load-extension testing of geotextiles confined in-soils. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOTEXTILES, 2., 1982, Las Vegas, 1982. p. 793-798.

PORTELINHA, F. H. (2012). *Avaliação experimental da influência do avanço do umedecimento no comportamento de muros de solos finos reforçados com geotêxteis não tecidos.* São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, 2012. p. 297.

SANTOS, S. F. *Análise de filmes poliméricos densos de AcC/PHAmcl por técnicas de DSC, DMA, XPS, ângulo de contato e AFM.* Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica, 2005. p. 71.

Scaffaro, D. T.; Mantia, L. A new equipament to measure the combined effects of humidity, temperature, mechanical stress and UV exposure on the creep behavior of polymers. *Polymer Testing*, 2008. p. 49-54.

SHUKLA, S. K.; , YIN, J. H. (2006). *Fundamentals of geosynthetic engineering.* Londres: Taylor & Francis Group, 2006. p. 403.

SIEIRA, A. C. *Estudo experimental dos mecanismos de interação solo-geogrelha.* Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica, 2003 p. 358.

SIEIRA, A. C.; SAYÃO, A. S. Influência do dano na resposta de geogrelhas submetidas ao arrancamento. *Revista Escola de Minas*, Belo Horizonte, v. .61, n. 4, P. 513-521, 2008.

TAFFE, E. J.; VIDAL, D. M.; RODRIGUES, R. M. Ensaio de puncionamento considerando condições de campo para análise do reforço de fundações. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA - COBRAMSEG, 12., 2002, São Paulo. São Paulo: ABMS, 2002. p. 1-8.

TEIXEIRA, C. F. (2006). *Análise numérica de ensaios em solo reforçado com geogrelha.* Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2006. p 132.

TRENTINI, R. S. *Análise da sinergia entre fatores de redução em geossintéticos submetidos a esforços de tração.* São José dos Campos: Instituto Técnologico de Aeronáutica, 2005. p. 124.

TRENTINI, R. S.; VIDAL, D. M. *Influência da estrutura polimérica nos parâmetros de comportamento de campo dos geossintéticos.* São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA, 2005. p. 6.

TUPA, N.; PALMEIRA, E. M. Comportamento de geotêxteis não-tecidos confinados em solos finos. *Geossintéticos*, São Paulo, 1995, p. 139-147.

VERTEMATTI, J. C. *Manual brasileiro de geossintéticos.* São Paulo: Edgard Blüncher, 2004. p. 413 .

VILAR, O. M. Geossintéticos em aplicações ambientais. *Teoria e Prática na Engenharia Civil*, Editora Dunas, n. 4, p. 69-85, 2004..

WHITTLE, A. J.; LARSON, D. G.; GERMAINE, J. T.; ABRAMENTO, M. A new device for evaluating load-transfer in geosynthetic reinforced soils. In: *ASTM STP 1190* , 1993. p. 1-15.

WILSON-FAHMY, R. F.; KOERNER, R. M.; FLECK, J. A. Unconfined and confined wide-width tension testing of geosynthetic. In: *ASTM STP 1190*, 1993. p. 49-63.

ZORNBERG, J. G. Ingenuity in geotechnical design using geosynthetics. *Geotechnical Engineering State of the Art and Practice*, 2012. p. 398-419.