



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO DE ENGENHARIAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ISABELLE GONDIM DAMACENO

**ESTUDO DA RESISTÊNCIA DE INTERFACE SOLO-GEOSSINTÉTICO PELO
ENSAIO DE RAMPA**

MOSSORÓ

2017

ISABELLE GONDIM DAMACENO

**ESTUDO DA RESISTÊNCIA DE INTERFACE SOLO-GEOSSINTÉTICO PELO
ENSAIO DE RAMPA**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Francisco Alves da Silva Junior,
Prof. Dr.

MOSSORÓ

2017

©Todos os direitos estão reservados à Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996, e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata, exceto as pesquisas que estejam vinculadas ao processo de patenteamento. Esta investigação será base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) seja devidamente citado e mencionado os seus créditos bibliográficos.

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Bibliotecas
da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, com os dados fornecidos pelo (a) autor (a)

D155e Damaceno, Isabelle.

Estudo da resistência de interface solo-
geossintético pelo ensaio de rampa / Isabelle
Damaceno. - 2017.
73 f. : il.

Orientador: Francisco Alves da Silva Júnior.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
2017.

1. Geossintético. 2. Interface. 3. Atrito. 4.
Solo Reforçado. 5. Tensão Cisalhante. I. Alves da
Silva Júnior, Francisco, orient. II. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

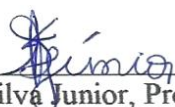
ISABELLE GONDIM DAMACENO

**ESTUDO DA RESISTÊNCIA DE INTERFACE SOLO-GEOSSINTÉTICO PELO
ENSAIO DE RAMPA**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Defendida em: 20 / 10 / 2017.

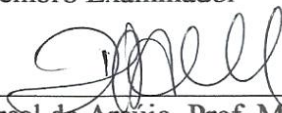
BANCA EXAMINADORA



Francisco Alves da Silva Junior, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente



John Eloi Bezerra, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador



Duílio Assunção Marçal de Araújo, Prof. MSc. (UFERSA)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço a DEUS, essencialmente, pela oportunidade e pelo privilégio que me foram dados em vivenciar tamanha experiência e por superar os obstáculos dessa caminhada com entusiasmo e perseverança.

Sou grata a todos aqueles que fizeram parte dessa minha valiosa trajetória, especialmente:

A minha família, que tanto acreditou em mim e sentiu orgulho a cada pequena vitória, me encorajando para prosseguir com a busca pela realização profissional;

Aos meus pais, Francilene Gadelha Gondim e José Glauber de Moura, que iluminaram o meu caminho, com amor e cuidado, para que eu lutasse com coragem e esperança por meus sonhos. Por renunciarem o tempo, o conforto da nossa casa e seus projetos para me apoiar e me estimular nessa jornada importante da minha vida;

Aos amigos, pelo companheirismo, carinho, atenção, troca de ideias e experiências. De forma singular, a Irleide Lima, cuja amizade foi uma força poderosa para as conquistas alcançadas.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Francisco Alves da Silva Junior, por ser um professor que desenvolve sua prática educativa com muita responsabilidade e competência. E ainda, pela orientação deste trabalho com dedicação e pelas intervenções enriquecedoras;

A todos os meus mestres, que desempenharam seu papel de educador com compromisso, conhecimento e afetividade, contribuindo efetivamente para a construção do meu saber;

Aos professores participantes da banca examinadora, o Prof. Dr. John Eloi e o Prof. MSc. Duílio Marçal, por se mostrarem atenciosos ao aceitar meu convite e por terem contribuído com o enriquecimento deste trabalho e com meu crescimento profissional.

Ao Prof. Dr. Fagner França (UFRN) pela disponibilidade em auxiliar no projeto do equipamento e nos esclarecimentos sobre a execução do ensaio.

Ao profissional Clarivaldo Alves, da Onix serviços metálicos, pelo excelente trabalho de confeccionar o equipamento do ensaio e pela atenção que me foi dada.

A Maccaferri do Brasil, em especial o Engenheiro civil Denilson Freitas, por ter fornecido o material para esta pesquisa e se mostrar disposto a auxiliar no decorrer do trabalho.

RESUMO

A utilização de geossintéticos para melhoramento do suporte da estrutura do talude, por exemplo, através de reforço, está cada vez mais presente nas obras de engenharia. Assim, as construções exigem um maior estudo sobre o comportamento de interação solo-geossintético. Por isso, foram citados os vários tipos de geossintéticos, as terminologias, características físicas, composição, propriedades mecânicas e durabilidade. Mas, o objeto principal deste estudo é a geogrelha. Portanto, o presente trabalho tem como objetivo analisar a interface solo-geogrelha para solo reforçado através do ensaio de rampa. E ainda, confeccionar uma aparelhagem que possa realizar o ensaio e testá-lo se é confiável. A pesquisa é de caráter experimental por possuir um equipamento construído e testado para a mesma. Na literatura científica existem vários trabalhos publicados sobre o assunto, tornando-se interessante uma revisão bibliográfica para o embasamento desta pesquisa, caracterizando uma pesquisa exploratória-descritiva. Paralelamente, foram feitos ensaios de caracterização do solo. Conforme os resultados obtidos, observou-se um aumento de 31,43% na resistência de interface com a introdução de geogrelha no solo específico. Logo percebe-se a importância desses materiais sintéticos para várias aplicações e os benefícios que a construção ganha com o uso desta técnica, como um melhor custo e facilidade de execução.

Palavras-chave: Geossintético. Interface. Atrito. Solo Reforçado. Tensão Cisalhante.

ABSTRACT

The use of geosynthetics to improve the support of the structure of the slope, for example through reinforcement, is increasingly present in engineering works. Thus, the constructs require a greater study on the behavior of soil-geosynthetic interaction. So, the various types of geosynthetics were cited, terminology, physical characteristics, composition, mechanical properties and durability. But, the main object of this study is the geogrid. Therefore, the present work objectives to analyze the soil-geogrid interface for reinforced soil through the ramp test. Also, make an apparatus that can perform the test and test it if is reliable. The research is experimental because it has equipment built and tested for it. In the scientific literature there are several published works on the subject, making a bibliographic review interesting for the base of this research, characterizing an exploratory-descriptive research. For this, an exploratory-descriptive research was carried out and it was possible to know more about what they had studied in relation to the reinforcement of soils with geosynthetics. At the same time, soil characterization tests were carried out. According to the results, there was a 31.43% increase in the interface resistance with the introduction of geogrid in the specific soil. Soon, the importance of these synthetic materials is perceived for various applications and the benefits that the construction gains with the use of this technique, as a better cost and ease of execution.

Keywords: Geosynthetics. Interface. Friction. Reinforced soil. Shear Tension.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Aterro sob sole mole com uso de geossintético.....	19
Figura 2 – Geossintéticos e polímeros.	25
Figura 4 – Monômeros dos principais polímeros.	26
Figura 5 – Elementos de Solo Com e Sem Reforço	28
Figura 6 – Reforço de solo: tensão-deformação.....	29
Figura 7 – Características de tração de geossintéticos.....	30
Figura 8 – Simulação de instalação de geossintético.....	32
Figura 9 – Resistência passiva das geogrelhas	34
Figura 10 – Mecanismos de interação solo-geossintético.....	35
Figura 11 – Cisalhamento direto convencional.	36
Figura 12 – Cisalhamento direto com reforço inclinado.....	37
Figura 13 – Ensaio de cisalhamento direto com plano inclinado.	37
Figura 14 – Ensaio de arrancamento.....	38
Figura 15 – Ensaio de rampa.	39
Figura 16 – Elementos da geogrelha.....	44
Figura 17 – Dois tipos de Geogrelha	45
Figura 18 – Corte da obra 1.....	45
Figura 19 – Execução da Obra 1.....	46
Figura 20 – Execução da Obra 2.....	46
Figura 21 – Execução da Obra 3.....	47
Figura 22 – Geogrelha de alta performance	47
Figura 23 – Equipamento de rampa.	50
Figura 24 – Adaptação da caixa inferior para base rígida.....	51
Figura 25 – Roletes	51
Figura 26 – Fixação da geogrelha.....	52
Figura 27 – Instalação da geogrelha sobre a base rígida com lixa P100.	52
Figura 28 – Compactação.....	53
Figura 29 – Equipamento de rampa já inclinado.	54
Figura 30 – Amostra de solo para os ensaios de caracterização.....	55
Figura 31 – Teor de umidade higroscópica.	55
Figura 32 – Amostra de solo no aparelho de Casa Grande.	56
Figura 33 – Amostras para determinação do Limite de Plasticidade	57

Figura 34 – Uso do picnômetro	57
Figura 35 – Material retido na peneira 10	58
Figura 36 – Material seco.....	59
Figura 37 – Peneiramento fino.	59
Figura 38 – Ensaio 1 na ruptura.....	68

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Limite de Liquidez da amostra de solo.....	61
Gráfico 2 – Análise Granulométrica	65
Gráfico 3 – Ensaio de rampa só com a amostra de solo.....	66
Gráfico 4 – Resultados dos ensaios de rampa da interface solo-geogrelha.	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos de geossintéticos	23
Tabela 2 – Principais aplicações dos geossintéticos.	24
Tabela 3 – Composição dos geossintéticos	26
Tabela 4 – Propriedades de degradação dos principais polímeros	27
Tabela 5 – Resumo da Norma NBR ISO 12957-2	41
Tabela 6 – Vantagens e desvantagens com o uso dos geossintéticos.	42
Tabela 7 – Tipos de geogrelhas	43
Tabela 8 – Características técnicas da MacGrid WG 90	49
Tabela 9 – Dimensões mínimas das caixas de ensaio.	50
Tabela 10 – Resultados obtidos para o teor de umidade higroscópica da amostra.	60
Tabela 11 – Resultados encontrados do Limite de Liquidez da amostra de solo.	61
Tabela 12 – Resultados do limite de plasticidade.	62
Tabela 13 – Índice de Plasticidade.	63
Tabela 14 – Massa específica dos grãos do solo.	63
Tabela 15 – Peneiramento.	64
Tabela 16 – Resumo da granulometria.	65
Tabela 17 – Resultados dos ensaios de rampa na interface do solo.	66
Tabela 18 – Resultados dos ensaios de rampa na interface solo-geogrelha.	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
ISO	International Organization for Standardization
IGS	Sociedade Internacional de Geossintéticos
GB	Geobarra
GG	Geogrelha
GI	Geotira
GS	Geoespaçador
GN	Georrede
GP	Geotubo
GM	Geomembrana
GA	Geomanta
GL	Geocélula
GC	Geocomposto
GT	Geotêxtil

LISTA DE SÍMBOLOS

FR_{amb}	Fatores de redução que considerem o efeito da degradação ambiental
FR_{dm}	Fatores de redução apropriados sobre resistência de referência do reforço
$T_{máx}$	Tração índice
$\varepsilon_{máx}$	Deformação na ruptura
J	Rigidez à tração
%	Porcentagem
$h\%$	Umidade higroscópica do solo
σ	Tensão normal atuante sobre o plano do geossintético
τ_{sr}	Resistência ao cisalhamento entre solo e o geossintético
a_{sr}	Adesão entre o solo e o geossintético
δ_{sr}	Ângulo de atrito entre o solo e o geossintético
$\sigma_{n,\beta}$	Tensão normal na inclinação β , em kPa
W	Massa de solo, pesos adicionados e qualquer parte da caixa superior apoiada ou não por roletes, em quilogramas
τ	Tensão cisalhante, em kPa;
β	Ângulo de escorregamento da caixa superior, em graus
A	Área de contato solo-geossintético
$f_{r\beta}$	Força requerida para reter a caixa superior vazia quando a base está inclinada a um ângulo β

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
2. OBJETIVOS	18
2.1 OBJETIVO GERAL	18
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
2.3 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO	18
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1 REFORÇO DE SOLO POR INCLUSÃO DE GEOSSINTÉTICOS.....	19
3.1.1 Aspectos Conceituais.....	20
3.1.2 Histórico	20
3.1.3 Cenário global atual.....	22
3.1.4 Cenário brasileiro atual.....	22
3.2 CLASSIFICAÇÃO DOS GEOSSINTÉTICOS.....	22
3.2.1 Aplicações dos geossintéticos	24
3.2.2 Composição dos geossintéticos	25
3.3 COMPORTAMENTO DO SOLO REFORÇADO.....	28
3.3.1 Conceito de solo reforçado.....	28
3.3.2 Propriedades dos geossintéticos como Materiais de Reforço de Solos	29
3.4 ENSAIOS DE INTERFACE SOLO-GEOSSINTÉTICO.....	35
3.4.1 Ensaio de Cisalhamento Direto	36
3.4.2 Ensaio de Arrancamento	38
3.4.3 Ensaio de Rampa	38
3.5 ENSAIO DE RAMPA: PLANO INCLINADO	39
3.6 VANTAGENS E DESVANTAGENS DO USO DE GEOSSINTÉTICOS.....	42
3.7 GEOGRELHA.....	43
3.8 EXEMPLOS DE OBRAS REALIZADAS COM O USO DE GEOSSINTÉTICOS	45
3.8.1 Obra 1.....	45
3.8.2 Obra 2.....	46
3.8.3 Obra 3.....	47
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	48
4.1 CLASSIFICAÇÃO DO ESTUDO.....	48
4.1.1 Quanto aos objetivos.....	48
4.1.2 Quanto à natureza	48

4.1.3 Quanto à abordagem	49
4.2 MATERIAIS UTILIZADOS	49
4.2.1 Solo	49
4.2.2 Geogrelha MacGrid WG 90.30.....	49
4.2.3 Equipamento para ensaio de rampa	50
4.3 MÉTODOS PARA ANÁLISE	54
4.3.1 Caracterização geotécnica	54
4.3.2 Ensaio de rampa	59
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	60
5.1 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA	60
5.1.1 Teor de umidade higroscópica.....	60
5.1.2 Determinação do Limite de Liquidez	60
5.1.3 Determinação do Limite de Plasticidade.....	62
5.1.4 Determinação do índice de plasticidade	62
5.1.5 Massa Específica dos grãos.....	63
5.1.6 Análise Granulométrica.....	64
5.2 ENSAIO DE RAMPA.....	66
6. CONCLUSÕES.....	69
REFERÊNCIAS.....	71

1. INTRODUÇÃO

O solo, um dos materiais mais utilizados na construção civil, está presente na grande maioria das obras de engenharia, sendo empregado, por exemplo, como base de suporte para estruturas das construções, assim torna-se relevante a necessidade de conhecer suas propriedades, para que seja feita uma previsão de como se comportará diante dos esforços solicitantes.

Muitas vezes, o solo em sua forma natural, não se encontra com capacidade de suporte requerida pelas solicitações referentes a obra que se deseja construir. Portanto, faz-se necessária a utilização de uma técnica de reforço para que se alcance a capacidade de carga desejada. Assim, a inclusão de geossintéticos para reforço solo assumiu um importante papel na engenharia geotécnica.

Uma solução, que vem crescendo bastante nos últimos anos, é o uso de geossintéticos como técnica para reforço de solos. A aplicação deste material tem uma ampla variedade, o que torna a opção mais atrativa. (MACCAFERRI, 2013a).

Geossintéticos, de acordo com a NBR 12553 (ABNT, 2003), são produtos industrializados a base de polímeros (sintéticos ou naturais), contendo propriedades que melhoram as soluções de obras geotécnicas. Onde, estes materiais são utilizados principalmente para reforço, impermeabilização (controle de fluxo), controle de erosão superficial filtração, drenagem, proteção e separação de camadas de solo.

Os geossintéticos formam um grupo de materiais sintéticos utilizados, na sua maioria em Geotecnia. Assim, o termo deriva da combinação de duas palavras: “geo”, fazendo relação à geotecnia, e “sintéticos” referente a matéria prima com que são fabricados. (BENJAMIN, 2017, *apud* PEDRONI, 2017). Porém, segundo o mesmo autor, os geossintéticos não são mais soluções exclusivamente geotécnicas, estão tomando espaço em todas as áreas da engenharia, como transportes e saneamento.

A grande variedade de utilização destes produtos e suas propriedades específicas permitem resolver problemas mais complexos, sendo uma opção relevante diante de grandes solicitações ou restrições impostas pela situação ou custos elevados de uma solução convencional. Tornando-se indispensável em muitas obras geotécnicas. Segundo a Maccaferri (2013a) o processo construtivo é, na maioria das vezes, rápido e simples, não exigindo mão de obra qualificada.

Diante da consideração de que o solo é um material abundante na natureza e um dos mais baratos na construção civil, faz-se necessário o estudo de suas propriedades para que se

obtenha uma solução que una segurança e economia. Vale ressaltar que o solo, na sua condição natural, nem sempre possui as propriedades necessárias para ser utilizado como material de construção ou como suporte para estruturas de engenharia. Tornando indispensável o estudo de técnicas de melhoramento de suas propriedades ou de sua capacidade de carga com adições de outros materiais.

Os geossintéticos oferecem soluções econômicas e tecnicamente avançadas em obras geotécnicas, aumentando a capacidade de suporte do solo em questão. O uso desses materiais significa uma redução no volume de transporte de solo e uma melhor relação custo benefício, tornando-se uma opção viável em relação a soluções como, por exemplo, a substituição de camadas de solo mole ou espessas camadas de aterro.

Com isso, torna-se clara a importância do estudo das opções de geossintéticos para reforço do solo em obras de engenharia, proporcionando maior segurança, confiabilidade e menores custos. O presente trabalho se justifica por estudar a interação solo-geossintético, analisando as opções mais comuns utilizadas na prática.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho apresenta como objetivo geral estudar os geossintéticos como elementos de reforço do solo e verificar o efeito do mesmo nos parâmetros de resistência de interface solo-geossintético.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Levantamento dos tipos mais comuns de geossintéticos usados para o reforço de solos.
- Classificar o tipo de solo coletado em um lote localizado no bairro Nova Betânia, na cidade Mossoró – RN.
- Analisar a interface solo-geossintético através do ensaio de rampa.

2.3 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO

Este estudo limita-se a análise da atividade da resistência de interface solo-geossintético através do ensaio de rampa, abrangendo uma visão geral, como também a realização do mesmo com um tipo de geogrelha específico. Neste trabalho foi coletada amostra de solo de uma microrregião de Mossoró para fazer a sua caracterização. Além disso, foram revisadas bibliografias sobre o assunto para melhor esclarecer o conhecimento sobre a técnica de utilização de geossintéticos para reforço de solos.

Não faz parte do conteúdo deste estudo analisar a interação do solo com os outros tipos de geossintéticos existentes no mercado da construção.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 REFORÇO DE SOLO POR INCLUSÃO DE GEOSSINTÉTICOS

A técnica de reforço de solo com geossintéticos vem se desenvolvendo de forma acelerada em todo o mundo, com aplicações diretas em contenção de encostas e em aterros sobre solos moles. A inclusão de elementos geossintéticos no aterro (figura 1) proporciona uma redistribuição global das tensões e deformações induzidas, permitindo que se adote estruturas mais inclinadas e com uma diminuição no volume de aterro compactado.

Figura 1 – Aterro sob sole mole com uso de geossintético.



Fonte: Maccaferri, 2017.

Atualmente, um dos tipos de geossintéticos mais utilizados para reforço são as geogrelhas, que são o foco deste estudo. Estas são formadas por elementos resistentes à tração e integralmente conectados, onde sua estrutura polimérica possui aberturas maiores do que seus elementos constitutivos, permitindo uma interação favorável com o solo na interface.

O uso de materiais geossintéticos em reforço, drenagem e recobrimento de taludes vem aumentando devido a facilidade de execução e a boa relação entre custo e benefício. A Maccaferri (2013a) afirma que nos últimos anos tem-se intensificado o estudo da interação solo-geossintético, referente ao comportamento destes materiais quando inseridos na massa de solo. Sendo uma interação complexa em função das características dos materiais envolvidos. Nos quais os parâmetros de resistência de interface do solo são determinados através de ensaios de campo ou de laboratório.

3.1.1 Aspectos Conceituais

3.1.1.1 Solo

De acordo com Das (2007), o solo é definido como um agregado não cimentado de grãos minerais e matéria orgânica decomposta (partículas sólidas), com líquidos e gás nos espaços vazios entre as partículas sólidas. Sendo que o conhecimento de propriedades como origem, distribuição dos grãos, capacidade de drenagem, compressibilidade, resistência ao cisalhamento e capacidade de carga, entre outras, são extremamente importantes para obras de engenharia civil.

3.1.1.2 Geossintéticos

Segundo a Sociedade Internacional de Geossintéticos (IGS) do Brasil, os Geossintéticos são “produtos industrializados com pelo menos um de seus componentes fabricado com polímero sintético ou natural” (IGS BRASIL, 2017). Podendo ser na forma de manta, tira, ou estrutura tridimensional. Geralmente, utilizados em contato com o solo ou com outros materiais.

3.1.1.3 Reforço de solo com geossintéticos

A GeoAcademy (2017), define reforço de solo com geossintéticos como sendo um sistema construtivo que emprega uma série de camadas de solo ou material granular e um geossintético, de forma alternada, podendo ser uma geogrelha ou um geotêxtil tecido, constituindo um maciço ou estrutura reforçada em obras de recomposição e contenção com taludes mais íngremes, encontros de ponte, aterros sobre solos moles e muros de arrimo, aumentando a sua capacidade de suporte.

3.1.2 Histórico

A inclusão de materiais para a melhoria da capacidade do solo é uma prática comum desde antes de Cristo. Solo misturado com palha, bambus, entre outros materiais vegetais constituídos de fibras resistentes, foram utilizados nos *Ziggurats*, bem como na Grande Muralha da China e em várias obras do Império Romano. (VERTEMATTI, 2001). Segundo o

mesmo, para a construção de muros de contenção, os antigos romanos utilizavam troncos perpendiculares à face, imersos em diferentes tipos de solo.

A primeira aplicação de um geotêxtil tecido de algodão em reforço de estradas foi nos Estados Unidos, por volta do ano de 1930 (BECKAM E MILLS, 1935, *apud* KOERNER, 2016). De acordo com Barret (1966), foram nos anos 40 que surgiu o polímero sintético e a primeira utilização de um geotêxtil de fibras sintética foi em 1950, na Flórida.

Segundo Vertematti (2001), a “Era dos Geossintéticos” iniciou-se após a Segunda Grande Guerra, através do desenvolvimento da indústria petroquímica e da disseminação dos produtos plásticos. Ainda de acordo com Vertematti, nos anos 50, em alguns países, aplicaram geotêxteis como elementos de filtro para proteção anti-erosiva em obras hidráulicas.

Já nos anos 60, o engenheiro francês Henri Vidal desenvolveu e patenteou a técnica e sistema “Terra Armada”, que inclui tiras de aço galvanizado como elementos de reforço de solos compactados. (VIDAL, 1986). Com isso, a técnica de reforço de solo com geossintético foi sendo disseminada pelo mundo.

É na década de 1970 que apareceram as aplicações: reforço de grandes aterros e barragens, camadas múltiplas em taludes e muros de contenção, e ainda, a inclusão do geossintético como elemento prolongador da vida útil de recapeamentos asfálticos e superestruturas ferroviárias (VERTEMATTI, 2001). Continuando segundo o mesmo, em 1971, no Brasil, iniciou-se a Era dos Geossintéticos com a fabricação do primeiro geotêxtil não tecido. E ainda, vários grupos técnicos foram surgindo na França, Alemanha e EUA para desenvolver normas específicas. Com isso, eventos discutindo o assunto foram realizados anos depois, como a *International Conference on the Use of Fabrics in Geotechnics*, em 1977 na França, quando o professor Jean Pierre Giroud criou os termos Geotêxtil e Geomembrana e propôs sua utilização.

Com o crescimento da relevância do assunto, a Associação Internacional de Geotêxteis (IGS) foi fundada em Paris, em novembro de 1983, por um grupo de engenheiros geotécnicos e especialistas têxteis. (IGS BRASIL, 2017). Esta associação reúne membros individuais e corporativos envolvidos em projetos, fabricação, vendas, uso ou ensaio de geomembranas e geotêxteis, produtos correspondentes e tecnologias associadas, ou que ensinam ou desenvolvem pesquisas sobre tais produtos. Na década de 1980, houveram outras edições da Conferência Internacional de Geotêxteis como a dos Estados Unidos em 1982 e a da Áustria em 1986. (VERTEMATTI, 2001).

O impulso gerado pelos casos históricos, estudos teóricos apresentados e as novas aplicações destes materiais nos anos 90, levam ao surgimento de uma variedade de produtos e seus diferentes usos (VERTEMATTI, 2001). Em 1992, realizou-se em Brasília, o Seminário sobre Aplicações de Geossintéticos em Geotecnia - Geossintéticos 92. Bem como, outros eventos nacionais e internacionais durante esta década. A IGS Brasil (2017), relata que sua criação foi em 1997, sendo resultado de junção de um amadurecimento do setor nacional e dos esforços de profissionais e empresas relacionados aos geossintéticos.

3.1.3 Cenário global atual

De acordo com Benjamim (2017, *apud* PEDRONI, 2017), ao redor do mundo, os avanços das tecnologias, juntamente com pesquisas, legislações específicas e rígidos critérios de qualidade, colaboraram muito para o desenvolvimento dos geossintéticos. Ainda segundo o mesmo, com um crescimento global de cerca de 11% nos últimos anos, estima-se que até 2018 o mercado de geossintéticos esteja próximo de U\$18 bilhões. E que até 2020, este mercado alcançará um volume de vendas aproximado de 7,3 bilhões de metros quadrados.

O continente que apresenta a maior taxa de crescimento de utilização dos geossintéticos é o asiático, com uma taxa de aproximadamente 16%. Embora os Estados Unidos continuem como líderes em utilização desses materiais. Nos EUA, somente em 2016 o faturamento em vendas dos geossintéticos chegou a U\$2,4 bilhões (BENJAMIN, 2017, *apud* PEDRONI, 2017).

3.1.4 Cenário brasileiro atual

Não existem dados oficiais e confiáveis, no Brasil, segundo Benjamin (2017, *apud* PEDRONI, 2017) o que dificulta conhecer o tamanho do nosso mercado. Mas se pode perceber que o mercado brasileiro cresceu muito nos últimos dez anos, tornando consolidadas as soluções com: geotêxteis, geogrelhas, geocélulas, geomembranas e geocompostos argilosos, dentre outros. Porém, o mercado brasileiro ainda é pequeno se comparado com o mercado mundial.

3.2 CLASSIFICAÇÃO DOS GEOSSINTÉTICOS

Os geossintéticos podem ser classificados genericamente pela sua função e fabricação.

Tabela 1 – Tipos de geossintéticos

TIPOS DE GEOSSINTÉTICOS		
Para reforço	Geobarra [GB]	Produto em forma de barra com função predominante de reforço.
	Geogrelha [GG]	Produto formado por uma rede regular de elementos integralmente conectados com abertura superior a 6,35mm a fim de permitir o imbricamento com o solo envolvente. Sendo utilizadas, quase exclusivamente, como elemento de reforço.
	Geotira [GI]	Produto em forma de tira com função predominante de reforço.
Para drenagem	Geoespaçador [GS]	Produto com estrutura tridimensional formada por vazios.
	Georrede [GN]	Produto com estrutura em forma de grelha.
	Geotubo [GP]	Produto de forma tubular.
Para controle e desvio de fluxo	Geomembrana [GM]	Produto bidimensional, de baixíssima permeabilidade, composto predominantemente por asfaltos, elastômeros ou plastômeros. Utilizado para controle de fluxo e separação, nas condições de solicitação.
Outros	Geomanta [GA]	Produto com estrutura tridimensional permeável, usado para controle de erosão superficial do solo, também conhecido como biomanta (biodegradável).
	Geocélula [GL]	Produto com estrutura tridimensional aberta, constituída de células interligadas, que confinam mecanicamente os materiais nela inseridos. Usado para reforço e controle de erosão.
	Geocomposto [GC]	Produzido através da união de um ou mais filtros geotêxteis a um núcleo drenante, mais indicados e utilizados em obras de drenagem.
	Geotêxtil [GT]	Produto têxtil de fibras sintéticas, identificado como manta permeável, flexível e pouco espessa, de vasta aplicação. Geralmente aplicado em reforço, drenagem, filtragem e separação.

Fonte: adaptado da Maccaferri, (2013a) e Revista Construção Mercado, (2009).

Os geossintéticos são utilizados em diferentes situações da engenharia, especialmente como: elementos para reforço de solos, drenos, filtros, camadas de separação ou impermeabilização. Diferentes propriedades são requeridas, dependendo da função a ser desempenhada na obra.

3.2.1 Aplicações dos geossintéticos

A utilização de geossintéticos em obras geotécnicas tem sido cada vez maior. Os geossintéticos têm sido utilizados em substituição aos materiais de construção tradicionais e como reforço dos materiais naturais. De acordo com Vertematti (2004), precisa ser levado em consideração o princípio de equivalência das funções, ou seja, na substituição de um material natural (solo, brita, enrocamento) por um geossintético é preciso que este atenda as mesmas funções em termos de durabilidade, permeabilidade, deformabilidade e resistência do material substituído. A tabela 2 abaixo mostra as principais aplicações dos geossintéticos.

Tabela 2 – Principais aplicações dos geossintéticos.

APLICAÇÃO	OBJETIVO
Reforço	Restringir deformações e aumentar a resistência do maciço em obras geotécnicas, aproveitando a resistência à tração do material geossintético.
Filtração	Permitir a passagem e coleta de fluidos, sem a movimentação de partículas do maciço.
Drenagem	Coletar e/ou facilitar os movimentos de fluidos no interior do maciço.
Proteção	Reduzir solicitações localizadas, homogeneizando o nível das tensões que atingiriam determinada superfície ou camada.
Separação	Evitar a mistura entre materiais granulares com características geotécnicas distintas.
Impermeabilização	Conter o avanço de uma pluma de contaminação, evitando a migração de líquidos ou gases em aplicações ambientais.
Controle de Erosão	Proteger a superfície do terreno contra o arraste de partículas pela ação de ventos e águas superficiais.

Fonte: Vertematti, 2004.

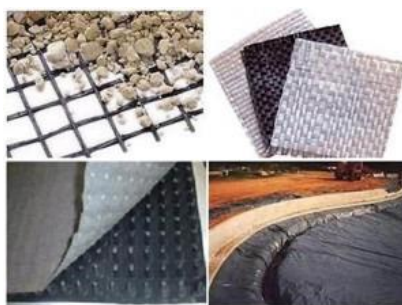
Em uma determinada situação, um geossintético pode desempenhar várias funções simultaneamente. Assim, para o dimensionamento adequado de uma obra com a inclusão de geossintéticos, faz-se necessário definir quais são as funções desempenhadas pelo material e definir as características que o mesmo deve possuir para desempenhar seu papel adequadamente (VERTEMATTI, 2004).

Alguns, como as geogrelhas, são predominantemente utilizadas em apenas uma aplicação, que é a de reforço. (MACCAFERRI, 2013a). Já os geotêxteis, segundo mesmo autor, são geralmente aplicados com as seguintes funções: reforço, drenagem, filtragem e separação, definidas anteriormente. Em uma determinada aplicação, um geossintético pode desempenhar

3.2.2 Composição dos geossintéticos

Os geossintéticos – figura 3 – são materiais compostos por polímeros. No qual, estes são substâncias macromoleculares de natureza orgânica, com peso molecular elevado, constituídas pela combinação de moléculas simples de baixo peso molecular chamadas de monômeros. (MARQUES, 2017).

Figura 2 – Geossintéticos e polímeros.



Fonte: Geofoco, 2014.

Segundo Costa *et al.* (2015), em termos químicos, os monômeros são constituídos geralmente por compostos de carbono e hidrogênio, organizando-se em grupos por vezes muito complexos. Esta junção através de mecanismos químicos, denomina-se polimerização, formando longas cadeias moleculares. Ainda de acordo Costa *et al.* (2015), é possível obter polímeros com uma variedade de propriedades distintas, através da quantidade e do tipo de monômeros que os constituem.

Caram (2017) afirma que o peso molecular dos polímeros afeta de forma significativa as propriedades químicas e físicas dos mesmos, pois quanto maior for o grau de polimerização, ou seja, o tamanho das cadeias, maior será o seu peso molecular. E este aumento (CABREIRA, 2009), ocasiona um aumento do alongamento de ruptura, resistência ao impacto, e viscosidade, e diminui a cristalização, resistência a tração e fluidez.

Os polímeros mais comumente empregados na fabricação dos geossintéticos são: o Poliéster (PET), Poliamida (PA), Polietileno (PE), Polietileno de baixa densidade (LDPE), Polietileno de baixa densidade linear (LLDPE), Polietileno de alta densidade (HDPE), Polipropileno (PP), Poliestireno (PS), Cloreto de Polivinilo (PVC), Copolímero de etileno com betume (ECB) e o Polietileno clorado (CPE). Onde, estes três últimos (PVC, ECB e CPE), só são usados para fabricação de geomembranas (COSTA et al., 2015).

Os geossintéticos e os quatro tipos de polímeros mais utilizados em sua fabricação, de acordo com Koerner (1998), estão apresentados na Tabela 2 a seguir.

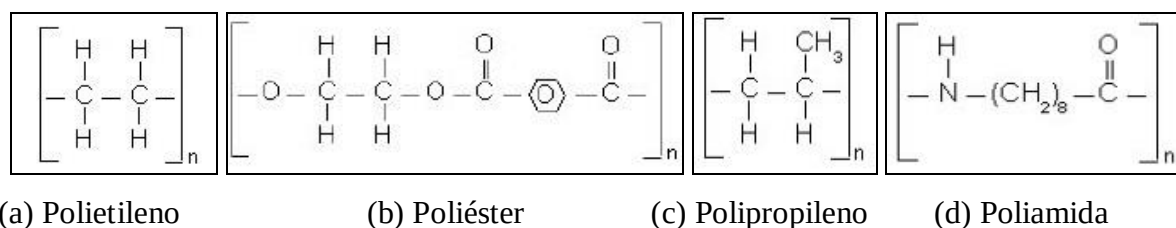
Tabela 3 – Composição dos geossintéticos

Polímero	Tipos de geossintéticos
Polietileno (PE)	Geogrelhas, Geotêxteis, Geomembranas, Geocompostos, Georredes
Polipropileno (PP)	Geogrelhas, Geotêxteis, Geomembranas, Geocompostos
Poliéster (PET)	Geogrelhas, Geotêxteis, Geocompostos
Poliamida (PA)	Geogrelhas, Geotêxteis, Geocompostos

Fonte: Adaptado de Koerner, 1998.

As geogrelhas, o foco deste trabalho, são geralmente compostas de polietileno de alta densidade – HDPE, de poliamida – PA, de poliéster – PET, ou de polipropileno – PP, no qual as mesmas caracterizam-se pela baixa deformabilidade e elevada resistência à tração (KOERNER, 1998). As propriedades finais do geossintético estão diretamente relacionadas com a composição química e a estrutura do polímero que o constitui (Figura 4).

Figura 3 – Monômeros dos principais polímeros.



Fonte: Adaptado de Koerner, (1998).

Na figura 4, n indica o grau de polimerização, ou seja, o número de vezes que o monômero se repete no respectivo polímero.

As poliefinas (polietileno e polipropileno), segundo Koerner (1998), são inflamáveis e apresentam baixa resistência à fluência e grande deformação na ruptura. O polipropileno é altamente resistente a degradação química e biológica, como mostra a tabela 3 mais abaixo, podendo ser empregado em ambientes agressivos, por exemplo, em aterros sanitários. Os poliésteres são pouco deformáveis, pouco susceptíveis à fluência, possuem módulo de elasticidade elevado, porém, são sensíveis à hidrólise.

Como já foi dito, o tipo de polímero influencia em diversas características dos geossintéticos, principalmente o comportamento a longo prazo (KOERNER, 1998). Dentre elas, destacam-se a resistência à degradação biológica, à degradação química, por ação dos raios ultravioleta, resistência à temperatura, à hidrólise, entre outras que estão especificadas na tabela 3 a seguir.

Tabela 4 – Propriedades de degradação dos principais polímeros

PROPRIEDADE	POLÍMERO		
	Poliéster (PET)	Polipropileno (PP)	Polietileno de Alta Densidade (HDPE)
Fluência	3	2	2
Hidrólise	1	2	2
Degradação Biológica	3	3	3
Degradação química a álcalis	1	2 a 3	3
Degradação química a ácidos	2	3	3
Foto-degradação	3	1* a 3**	1* a 3**
Termo-oxidação	3	1	1

*Sem tratamento, **Com tratamento.

Legenda: resistência baixa (1), resistência média (2), resistência alta (3).

Fonte: Adaptado de John (1987) e denHoedt (1988).

Nesta tabela 4, os níveis de resistência a degradação do geossintético de acordo com seu polímero são: resistência baixa – 1, resistência média – 2, resistência alta – 3.

As propriedades de um geossintético podem ser melhoradas através da inclusão de aditivos durante o processo de fabricação. Segundo Palmeira (1999a), os aditivos mais comumente utilizados são os anti-UV, os antioxidantes e os estabilizantes térmicos. Assim, o melhoramento de um polietileno através de aditivos, pode ser feito diretamente nas seguintes

propriedades: a resistência à oxidação, estabilidade térmica e resistência às radiações ultravioletas.

Palmeira (1999a) afirma que o polipropileno é muito susceptível à oxidação, portanto deve-se incluir aditivos que retardem o envelhecimento. Já os poliésteres são polímeros que possuem maior resistência e uma menor fluência. Porém, possuem uma maior sensibilidade à soluções alcalinas e um custo mais elevado que os outros citados acima.

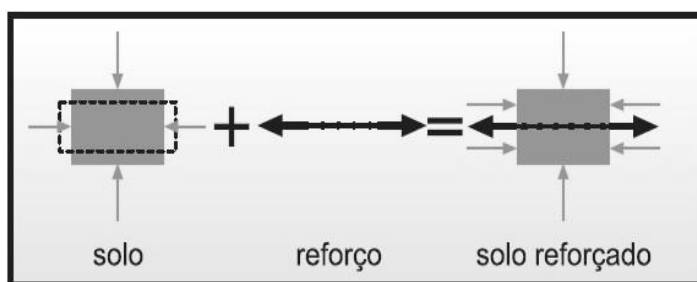
Assim, deve-se verificar o tipo de obra, o solo em questão, a função que o geossintético vai realizar e a composição do mesmo para que atenda à demanda e solicitação da obra que se deseja executar.

3.3 COMPORTAMENTO DO SOLO REFORÇADO

3.3.1 Conceito de solo reforçado

Uma das técnicas de melhoramento das características de um solo consiste na inclusão de geossintéticos, que são elementos resistentes convenientemente orientados, os quais, possuem características que tornam o material composto mais resistente e menos deformável que o solo isolado. (PALMEIRA, 1999b). A figura 5 mostra a diminuição das deformações no solo, quando utilizado um elemento de reforço.

Figura 4 – Elementos de Solo Com e Sem Reforço



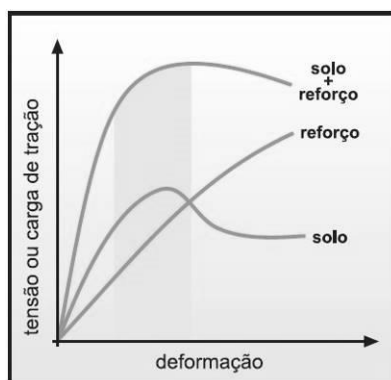
Fonte: Palmeira, 1999b.

No reforço de solos, o comportamento global do maciço é melhorado através transferência de esforços para os elementos resistentes. Assim, os geossintéticos permitem que o solo suporte um esforço cisalhante maior do que se fosse somente o próprio maciço. Com isso, o melhoramento das propriedades mecânicas do maciço através da inclusão de um reforço com geossintético, permite a construção de um talude ou um aterro sobre solo mole mais íngreme, quando o carregamento corresponde ao peso próprio do solo (JEWELL, 1996).

Ainda segundo o mesmo autor, quando o carregamento é causado por cargas externas, o uso do reforço pode permitir a aplicação de uma carga maior em uma estrada não pavimentada, por exemplo.

Em geral, os solos possuem uma resistência elevada a esforços de compressão, mas em relação a esforços de tração, a resistência é baixa (WHEELER, 1996). Quando o carregamento é vertical, a massa de solo sofre deformações verticais de compressão e deformações laterais de extensão, ou seja, tração. Mas, de acordo com Wheeler (1996), se houver a inclusão do reforço, estas deformações laterais ocorrem de forma limitada devido baixa deformabilidade do reforço. A Figura 6, que dispõe de um gráfico tensão-deformação, ilustra o comportamento do solo reforçado: o aumento de resistência e a diminuição das deformações.

Figura 5 – Reforço de solo: tensão-deformação.



Fonte: Palmeira, 1999b.

Ao desenvolver esforços de tração no geossintético e restringir as deformações, o solo tende a mover em relação ao reforço gerando tensões cisalhantes na interface solo/reforço. Onde estas tensões, são absorvidas pelo reforço, que é então tracionado, causando uma redistribuição das tensões no solo e gerando uma parcela de confinamento interno, adicional ao confinamento externo já existente (WHEELER, 1996).

3.3.2 Propriedades dos geossintéticos como Materiais de Reforço de Solos

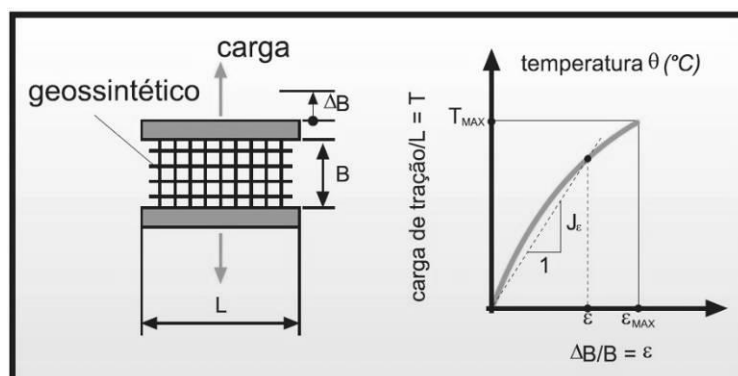
3.3.2.1 Resistência e rigidez à tração

O comportamento de um geossintético em solicitações de tração, de acordo com Palmeira (1999b), depende de vários fatores como o tipo de polímero, a estrutura, processo de

fabricação, entre outros. Tem-se uma variedade de valores de resistência à tração dos geossintéticos que podem atender aos requisitos da obra em questão.

O ensaio de tira larga determina a resistência à tração índice ($T_{\text{máx}}$), a deformação na ruptura ($\varepsilon_{\text{máx}}$) e a rigidez à tração (J) do geossintético, como apresenta a Figura 7.

Figura 6 – Características de tração de geossintéticos.



Fonte: Palmeira, 1999b.

A norma NBR ISO 10319 (ABNT, 2013) recomenda que os ensaios de faixa larga, para determinar a resistência à tração não confinada, sejam executados com corpos de prova de dimensões de 20 cm de largura (L) por 10 cm de comprimento (B), submetidos a um esforço de tração a uma velocidade de 20 cm/min. O comprimento B refere-se à distância entre as duas garras responsáveis por tracionar o geossintético, localizadas nas extremidades da amostra deste material.

Para geogrelhas, a norma NBR ISO 10319 (ABNT, 2013), ainda ressalta que faz-se necessário utilizar dimensões maiores que as relatadas acima de forma que passe o tamanho das garras, devido à abertura das malhas desse material. E que contenha pelo menos uma fileira de nós na região que fica entre as garras.

Esta mesma norma, afirma que a resposta dos geossintéticos quando sujeitos à tração é caracterizada pela relação entre a força por unidade de largura, sendo expressa em kN/m e a deformação longitudinal, expressa em %. Portanto, obtêm-se o módulo de rigidez, a resistência à tração e a deformação na ruptura do geossintético ensaiado.

3.3.2.2 Fluência

Palmeira (1999b) define Fluência como “o processo de deformação lenta de um material sob tensão constante”. Em outras palavras, é a capacidade que um material tem de

alongamento, quando submetido a um carregamento estático de longa duração. Em solos reforçados, o geossintético é submetido à tração durante toda a sua vida útil. Assim, e de extrema importância que sejam determinadas as características de fluência do geossintético.

A estabilidade do material quanto à fluência está ligada ao nível de carregamento submetido. Portanto, se o geossintético está submetido a uma carga baixa de tração, quando comparado à sua resistência máxima à tração – ensaio rápido – o mesmo poderá levar bastante tempo para romper por fluência. Ou seja, quanto mais próxima a solicitação tiver da tração máxima, mais rápido será a ruptura por fluência (PALMEIRA, 1999b). Materiais que compõem os geossintéticos tais como poliéster e poliamida apresentam baixa susceptibilidade à fluência, enquanto o polipropileno e o polietileno apresentam maior susceptibilidade, como visto na Tabela 4 deste trabalho.

Para a norma NBR 15226 (ABNT, 2005), o ensaio de fluência para geossintéticos submetidos à tração, propõe métodos para a avaliação do comportamento em deformação e da ruptura por fluência, em tração não confinada. Para a análise do comportamento em deformação, a norma recomenda aplicar 4 níveis de carga, sendo para cada corpo de prova, selecionados entre 5 e 60% da resistência máxima estabelecida em ensaio pela norma NBR ISO 10319:2013, medindo-se as deformações ao longo de 1000h.

Para a análise da ruptura por fluência, a norma NBR 15226 (ABNT, 2005) pede para aplicar 4 níveis de carga, sendo que para cada nível utiliza-se 3 corpos de prova, selecionados entre 50 e 90% da resistência máxima em ensaio índice da NBR ISO 10319, medindo-se o tempo necessário até a ruptura.

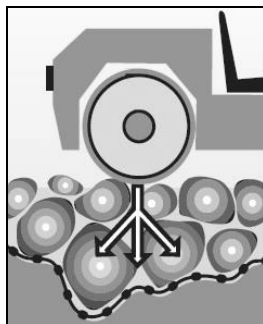
Conforme Jewell (1996), para evitar que o geossintético se deforme muito, são determinados limites aceitáveis para a deformação máxima. São valores típicos da ordem de 1 a 2% para aterros de encontro de pontes, 3 a 5% para taludes íngremes e 4 a 8% para aterros sobre solo mole. Os resultados de ensaios de fluência são apresentados em forma de isócronas de tensão-deformação, ou em função do tempo para a ruptura por fluência.

3.3.2.3 Resistência a Esforços de Instalação (Danos Mecânicos)

Esforços de instalação, para Palmeira (1999b) são aqueles a que o geossintético está submetido durante a sua própria instalação, o espalhamento e compactação do material de aterro sobre si. Geralmente, quanto menor a gramatura do geossintético, mais suscetível a danos de instalação ele é.

A figura 8 a seguir, mostra a simulação de instalação de geossintético que pode provocar danos ao mesmo, como a acomodação do solo no geossintético e a compactação.

Figura 7 – Simulação de instalação de geossintético



Fonte: Palmeira, 1999b.

O geossintético perde resistência através dos danos de instalação e isto pode ser levado em consideração nos projetos de obras em solo reforçado, adotando de fatores de redução apropriados sobre a resistência de referência do reforço (FR_{dm}). (PALMEIRA, 1999b).

3.3.2.4 Resistência química e biológica (degradação ambiental)

Os geossintéticos recebem aditivos durante o processo de fabricação ou são confeccionados com polímeros bastante resistentes à maioria dos processos químicos e biológicos que ocorrem no meio ambiente, especialmente, no solo (PALMEIRA, 1999).

Os principais agentes de degradação dos geossintéticos, segundo Carneiro (2009), são: os ácidos e as bases, as temperaturas elevadas, o oxigênio atmosférico, a radiação solar (principalmente a UV), a umidade e os microrganismos.

Amostras de geossintéticos desenterradas de obras existentes (com até 20 anos) têm apontado que o efeito de degradação ambiental do reforço é mínimo (PALMEIRA, 1993). Koerner (1998) afirma a possibilidade de durabilidade dos geossintéticos superar algumas centenas de anos. O grau de resistência tem muito a ver com o polímero que é composto o geossintético. A resistência a degradação ambiental e biológica dos principais polímeros constituintes dos geossintéticos, foi apresentada na Tabela 4.

Mesmo com os aditivos e os polímeros mais resistentes, é recomendável por Palmeira (1999b) a utilização de fatores de redução que considerem o efeito da degradação ambiental (FR_{amb}) na resistência do geossintético, especialmente para obras que devem possuir uma vida útil elevada.

Palmeira (1993) recomenda ter mais cuidado em aplicações de geossintéticos, principalmente as de longo prazo, quando os solos tiverem: com elevada salinidade, ou altamente orgânicos, ou com elevada quantidade de sulfatos, ou ainda, contendo partículas ferruginosas.

3.3.2.5 Resistência ao Puncionamento

A resistência ao puncionamento é definida como a medição da vulnerabilidade dos geossintéticos a compressões diferenciais ou a choques provocados pela queda de materiais. Esta solicitação pode ser concentrada, estática ou dinâmica.

De acordo com a norma NBR 13359/95, a resistência à penetração por puncionamento estático é determinada utilizando-se punção tipo CBR. O procedimento adotado aplica-se a geotêxteis, geomembranas e produtos correlatos de pequena a média abertura.

O risco de danos por impacto é avaliado através de ensaio de determinação da resistência ao puncionamento dinâmico (ISO 13433/99). A resistência ao puncionamento dinâmico corresponde à energia mínima para que um cone padrão puncione o geossintético.

3.3.2.6 Grau de interação com o solo

Numa estrutura em solo reforçado, existe a interação entre o solo e o geossintético, ocorrendo a transferência de tensões entre esses dois materiais. Os ensaios de laboratório mais comumente utilizados para quantificar essas propriedades são o ensaio de cisalhamento direto e o ensaio de arrancamento. (PALMEIRA, 1999b). Bem como o ensaio de rampa, que este é o foco do estudo. Estes ensaios serão explanados melhor no próximo item.

A resistência da interface entre o solo-geossintético, segundo o mesmo autor, é função da adesão (a) e do ângulo de atrito de interface (ϕ_{sg}), e é expressa pela equação 1:

$$\tau_{sr} = a + tg \delta_{sr} \quad (1)$$

Onde:

τ_{sr} = resistência ao cisalhamento entre solo e o geossintético;

a_{sr} = adesão entre o solo e o geossintético;

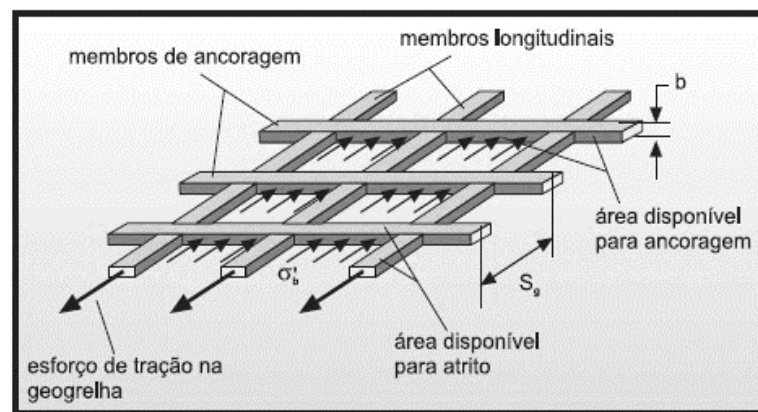
σ = tensão normal atuante sobre o plano do geossintético;

δ_{sr} = ângulo de atrito entre o solo e o geossintético.

De acordo com o tipo de análise a ser realizada, pode-se expressar em termos de tensões totais ou efetivas, os parâmetros de aderência e a tensão normal na 1, acima. Os valores de adesão dependem do tipo de solo e das condições de carregamento, compactação e umidade do mesmo. Desta forma, tem-se (Palmeira, 1999): $a_{sr} = 0$, para areias; a_{sr} , para solos argilosos, dependente das condições de carregamento (rápido ou lento) a serem observadas na obra. Já para solos compactados, a_{sr} variável em função da coesão do solo com a sucção, que é função da umidade. Na ausência de dados confiáveis, sugere-se $a_{sr} = 0$ (valor conservador).

No caso de geogrelhas, além das parcelas de aderência por adesão e atrito nas superfícies superior e inferior, dispõe-se também da resistência passiva (ou resistência por ancoragem) que é desenvolvida nos membros transversais, como mostra a figura 9.

Figura 8 – Resistência passiva das geogrelhas



Fonte: Palmeira, 1998.

Calcula-se, a partir dos ensaios de cisalhamento direto e de arrancamento, respectivamente, o coeficiente de deslizamento direto (C_d) e o coeficiente de interação (C_i). Onde, C_d corresponde à relação entre a resistência ao cisalhamento da interface solo-geossintético e a resistência ao cisalhamento do solo. De forma análoga, C_i é a relação entre a tensão cisalhante de arrancamento em uma das faces do geossintético e a resistência ao cisalhamento do solo. Para solos não-coesivos, de acordo com Palmeira (1999b), temos a equação 2:

$$C_d = \frac{\tau_{sr}}{\tau_s} = \frac{tg \delta_{sr}}{tg \phi} \quad (2)$$

onde:

τ_{sr} = tensão de aderência entre solo e reforço;

τ_s = resistência ao cisalhamento do solo;

δ_{sr} = ângulo de atrito entre solo e reforço;

ϕ = ângulo de atrito do solo;

τ_a = tensão cisalhante de arrancamento em uma das faces do geossintético;

T_a = carga de arrancamento;

L_a = comprimento de ancoragem;

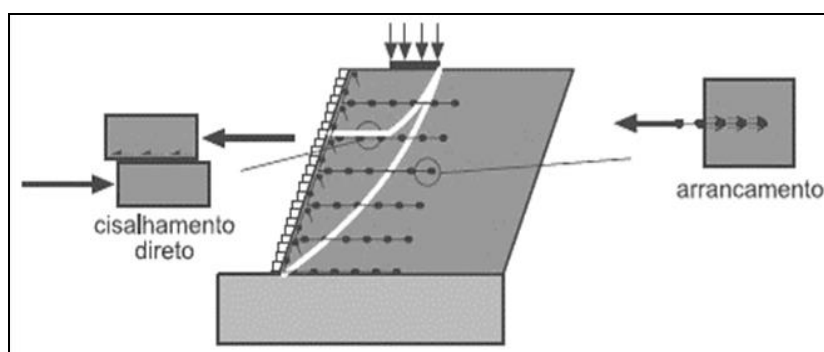
σ = tensão normal no plano do reforço.

3.4 ENSAIOS DE INTERFACE SOLO-GEOSSINTÉTICO

Os ensaios de campo são mais representativos que os de laboratório, porém apresentam um custo elevado e uma dificuldade maior de execução. Já os ensaios de laboratórios têm menor custo, mas podem sofrer limitações quanto ao tamanho e a representatividade da amostra.

Os ensaios normalmente aplicados para a análise da interação solo-geossintético são o cisalhamento direto convencional e inclinado, reforço inclinado e o arrancamento (PALMEIRA, 1999b). A Figura 10 ilustra estes dois primeiros ensaios e a aplicação em uma obra em solo reforçado.

Figura 9 – Mecanismos de interação solo-geossintético.



Fonte: Palmeira, 1999b.

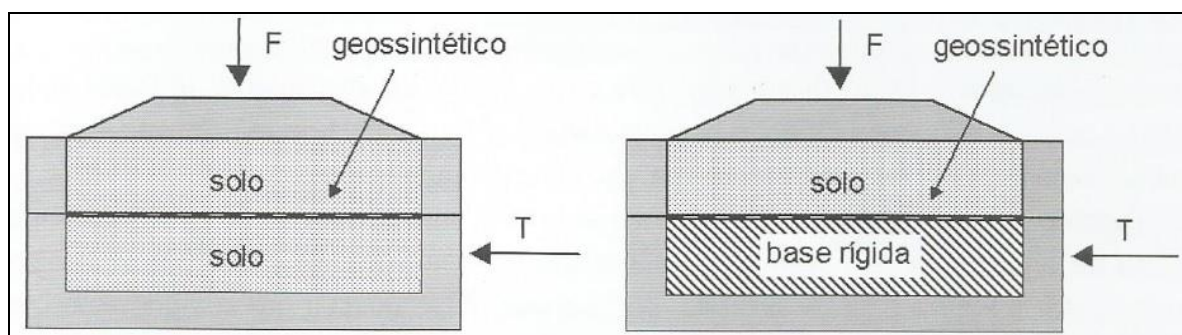
A escolha de qual ensaio será realizado depende do tipo de movimento relativo desenvolvido na interação solo-geossintético. E ainda, o ensaio de plano inclinado (rampa) aplica-se a casos onde o geossintético está aderido a face de um talude, onde pode ocorrer deslizamento ao longo do contato solo-geossintético.

3.4.1 Ensaio de Cisalhamento Direto

3.4.1.1 Convencional

De acordo com a Maccaferri (2013a), os ensaios de cisalhamento direto convencionais são realizados com geossintético assentado entre as duas metades da caixa de cisalhamento, sendo a resistência dada pela dificuldade do deslizamento relativo de uma das metades da caixa em relação ao geossintético. A metade inferior da caixa pode estar preenchida com solo, ou com um suporte rígido, como mostra a figura 11.

Figura 10 – Cisalhamento direto convencional.



(a) Caixa inferior preenchida com solo.

(b) Caixa inferior constituída por base rígida.

Fonte: Maccaferri, (2013a, *apud*. Siebra, 2003).

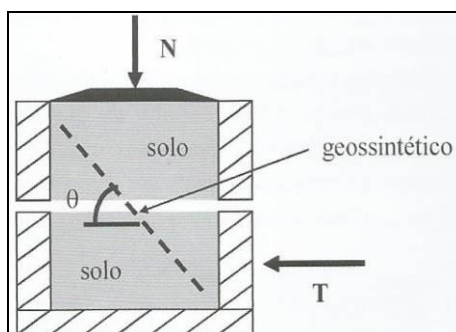
Ainda segundo a Maccaferri (2013a), durante o ensaio de cisalhamento, mede-se a força horizontal necessária para deslocar a parte superior da caixa sob força normal constante. Assim, o valor de tensão cisalhante na ruptura é a razão entre a força responsável por promover o cisalhamento e a área de contato entre as duas partes da caixa de cisalhamento.

3.4.1.2 Reforço inclinado

O ensaio de cisalhamento direto com reforço inclinado permite simular a conjuntura em que camadas horizontais de reforço são solicitadas ao cisalhamento por uma superfície potencial de ruptura de um talude (MACCAFERRI, 2013a). Assim, ainda de acordo com este autor, a amostra de reforço é posicionada com uma determinada inclinação em relação à caixa de ensaios de tal forma que a superfície de cisalhamento intercepte o geossintético, onde este deve possuir um comprimento mínimo para mobilizar a resistência ao arrancamento.

A figura 12 representa o ensaio de cisalhamento direto com reforço inclinado, na qual a situação foi descrita acima.

Figura 11 – Cisalhamento direto com reforço inclinado



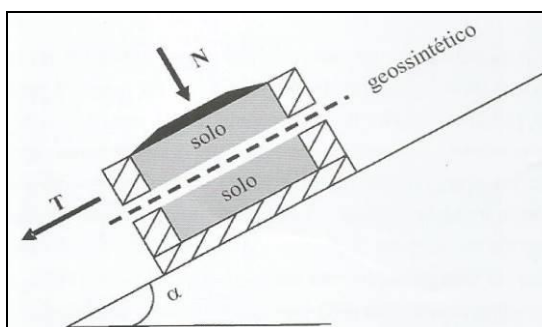
Fonte: Maccaferri, (2013a).

Este tipo de ensaio é bastante interessante, embora exista uma grande dificuldade na interpretação dos resultados e utilização dos dados para o dimensionamento de estruturas em solo reforçado (MACCAFERRI, 2013a).

3.4.1.3 Plano inclinado

O ensaio de cisalhamento direto inclinado foi desenvolvido para a obtenção de parâmetros de interface em condições de baixas tensões normais, de acordo com Maccaferri (2013), semelhantes aos dos ensaios de rampa (citados no item 3.4.3 deste estudo). Adaptou-se o equipamento de cisalhamento direto convencional, fixando-o ao equipamento de ensaio de rampa. (MACCAFERRI, 2013a). Esse conjunto é mostrado a seguir (figura 13).

Figura 12 – Ensaio de cisalhamento direto com plano inclinado.



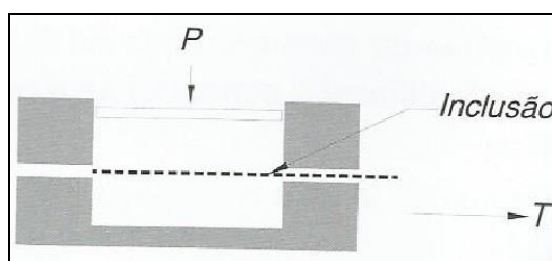
Fonte: Maccaferri, (2013a).

O equipamento é constituído por duas caixas de aço, no qual a caixa superior é livre para se deslocar, enquanto a caixa inferior é fixa na rampa de ensaio.

3.4.2 Ensaio de Arrancamento

O ensaio de arrancamento avalia o comportamento de elementos de reforço incluídos no solo, quando solicitados por uma força de tração capaz de provocar a perda de aderência com o solo envolvente (MACCAFERRI, 2013a). Este ensaio é realizado em equipamentos de cisalhamento direto adaptados com uma garra que impõe os deslocamentos horizontais de arrancamento do geossintético, representado na figura 14.

Figura 13 – Ensaio de arrancamento.



Fonte: Teixeira (2003, *apud*. MACCAFERRI, 2013a).

No ensaio, o geossintético é colocado entre duas camadas de solo – caixas de cisalhamento – e uma extremidade é conectada à garra e tracionada sob velocidade constante. Assim, o movimento relativo entre o geossintético e o solo dá origem as forças de cisalhamento, que se opõem ao movimento, nas duas faces do geossintético (MACCAFERRI, 2013a).

3.4.3 Ensaio de Rampa

Segundo a Girard *et al.*, (1990, *apud*. MACCAFERRI, 2013a), existem situações reais, como sistemas de controle de erosão, em que a utilização de parâmetros de interfaces obtidos através de ensaios de cisalhamento direto pode conduzir a erros que contrariam a segurança, nos quais estão relacionados, principalmente, à utilização de baixos níveis de tensão. Assim, ainda segundo os mesmos autores, o ensaio de rampa é uma boa opção para se verificar situações em que se tenham camadas superficiais de geossintéticos em taludes muito inclinados, quanto a sua estabilidade.

Aguiar (2008, *apud*. MACCAFERRI, 2013a), afirma que o ensaio consiste em uma caixa rígida superior que confina uma amostra de solo sobre uma camada de geossintético preso ao equipamento, inicialmente posicionado na direção horizontal. Abaixo do

geossintético tem-se outra caixa, maior que a superior, preenchida com solo. E com o corpo de prova instalado, o ensaio é realizado aumentando a inclinação das caixas, de forma gradual, até que ocorra o deslizamento da caixa superior ao longo da interface solo-geossintético (AGUIAR, 2008, *apud*. MACCAFERRI, 2013a). Este ensaio, como é o foco deste trabalho, será explanado de forma mais específica no próximo item.

3.5 ENSAIO DE RAMPA: PLANO INCLINADO

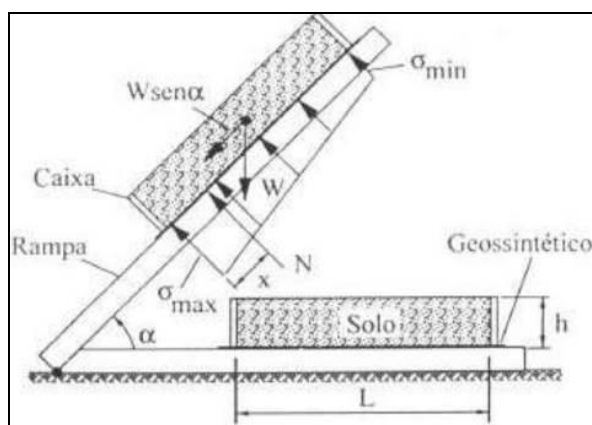
O princípio do ensaio de rampa definido pela norma NBR ISO 12957-2 é:

O ângulo de atrito para o sistema solo/geossintético é determinado medindo-se o ângulo no qual uma caixa preenchida com solo (com a possibilidade de adição de sobrecarga) desliza quando a base que suporta o geossintético é inclinada a uma velocidade constante. (ABNT, 2013, p. 2).

A norma NBR ISO 12957-2 (2013) apresenta as recomendações e exigências para a execução do ensaio de rampa, bem como as dimensões mínimas das caixas de ensaio e dos instrumentos necessários para monitoramento dos deslocamentos angular e linear. Assim, a tabela 5 a seguir, que continua na próxima página, resume os principais pontos desta norma.

A figura 15 possui a representação esquemática do equipamento de ensaio de rampa, mostrando a cargas e forças atuantes.

Figura 14 – Ensaio de rampa.



Fonte: Mello *et al.*, (2003).

Segundo a norma NBR ISO 12957-2 (ABNT, 2013), para ensaio com aparelhagem apoiada por roletes ou não, a equação 3 define a tensão normal média que atua sobre a superfície de contato solo-geossintético, com inclinação.

$$\sigma_{n,\beta} = \frac{9,81 \times W \times \cos \alpha}{1000 \times A} \quad (3)$$

Onde:

$\sigma_{n,\beta}$ = tensão normal na inclinação β , em kPa;

W = massa de solo, pesos adicionados e qualquer parte da caixa superior não apoiada por roletes, em quilogramas;

β = ângulo de escorregamento da caixa superior, em graus;

A = área de contato solo-geossintético, em m².

Ainda de acordo com esta norma, para a aparelhagem apoiada por roletes, tem-se a tensão cisalhante a ser calculada pela equação 4.

$$\tau = \frac{9,81 \times ((W \sin \beta) + f_{r\beta})}{1000 \times A} \quad (4)$$

Onde:

τ = tensão cisalhante, em kPa;

W = massa de solo, pesos adicionados e qualquer parte da caixa superior não apoiada por roletes, em quilogramas;

β = ângulo de escorregamento da caixa superior, em graus;

$f_{r\beta}$ = a força requerida para reter a caixa superior vazia quando a base está inclinada a um ângulo β ;

A = área de contato, em metros quadrados

Outro cálculo necessário para este ensaio com utilização de apoio do tipo roletes é o ângulo de atrito, verificado pela equação 5.

$$\tan \varphi_{gp} = \frac{\tau}{\sigma_{n\beta}} \quad (5)$$

Onde:

τ = tensão cisalhante, em kPa;

$\sigma_{n\beta}$ = tensão normal na inclinação β , em kPa;

A norma NBR ISO 12957-2 (2013) apresenta as recomendações e exigências para a execução do ensaio de rampa, bem como as dimensões mínimas das caixas de ensaio e dos instrumentos necessários para monitoramento dos deslocamentos angular e linear (Tabela 5).

Tabela 5 – Resumo da Norma NBR ISO 12957-2

	RECOMENDAÇÕES E EXIGÊNCIAS – NBR ISO 12957-2
1	O ensaio pode ser realizado com dois tipos de equipamento: a caixa inferior preenchida com base rígida ou com o solo, onde o geossintético estará em cima.
2	Caso exista caixa inferior, esta deverá ter dimensões internas mínimas de 0,4m de comprimento, 0,325m de largura e 0,05m de profundidade, ou ser de no mínimo sete vezes a dimensão máxima das partículas de solo.
3	Se a base for rígida, para geogrelhas e geotêxteis com estruturas abertas, o suporte usado deve ser solo ou lixa de esmeril abrasiva P100.
4	A caixa superior irá deslizar sobre o geossintético durante o ensaio, contendo solo, deverá ter dimensões mínimas de 0,3m de comprimento, 0,3m de largura e 0,05m de profundidade, ou no mínimo sete vezes a dimensão máxima das partículas de solo.
5	A caixa superior pode ser equipada com roletes deslizando sobre guias fixadas nas laterais fora da região do corpo de prova do geossintético. Neste caso, o interior da caixa superior deve ser revestido com chapas de aço lisas ou uma superfície de baixo atrito, para reduzir o atrito entre o solo e os lados da caixa.
6	O equipamento deve possuir um mecanismo que lhe permita inclinar uma superfície, com uma velocidade constante que garanta uma elevação de cerca de 5% do comprimento da superfície por minuto.
7	O equipamento deve possuir dispositivos que lhe permitam medir o deslocamento linear e angular da caixa superior durante o ensaio.
8	O geossintético deve ser assentado na superfície de apoio do equipamento de rampa, evitando qualquer deslocamento relativo entre ele e esta superfície.
9	A distância entre a base da caixa superior e o geossintético deve ser ajustável ou definida de forma que a caixa superior não exerça pressão sobre o corpo de prova. A distância deve estar entre 0,5 mm e 1,5 mm para minimizar a perda de solo durante o ensaio.
10	A aparelhagem de plano inclinado deve ser provida de um sistema de medida de ângulo que permita medir o ângulo de inclinação da caixa inferior com a horizontal com uma precisão de $\pm 0,5$ graus.

Fonte: Adaptado da NBR ISO 12957-2, ABNT, (2013).

3.6 VANTAGENS E DESVANTAGENS DO USO DE GEOSSINTÉTICOS

As obras executadas com a técnica de solo reforçado com geossintético apresentam vantagens técnicas, construtivas e econômicas, quando comparadas aos métodos convencionais. Por isto, está cada vez mais utilizada e difundida. (MACCAFERRI, 2013b).

Assim, segundo Jewell (1996), esta técnica possui vantagens que estão dispostas na Tabela 6 abaixo, bem como algumas desvantagens.

Tabela 6 – Vantagens e desvantagens com o uso dos geossintéticos.

USO DE GEOSSINTÉTICOS		
Nº	VANTAGENS	DESVANTAGENS
1	Aumento da velocidade de execução da obra, em função da economia de materiais e de espaço;	Possíveis danos aos geossintéticos durante estocagem, manuseio e instalação do produto;
2	É possível construir em praticamente todos os tipos de solo e para qualquer geometria;	Incertezas sobre as propriedades de longo prazo e a durabilidade do material;
3	Acesso ao local da obra total, pois o solo reforçado é estável durante a construção;	
4	Redução da necessidade de remoção do solo de fundação e minimização do consumo do material de aterro, devido à possibilidade de construção de taludes mais íngremes;	
5	Materiais resistentes, com a união da resistência ao cisalhamento do solo com a resistência à tração do reforço;	
6	Flexibilidade e tolerância à deformação da estrutura em solo reforçado;	
7	Possibilidade de criação de novas soluções	
8	Possibilidade de utilização de material de aterro mais fraco.	

Fonte: Adaptado de Jewell (1996).

3.7 GEOGRELHA

As geogrelhas, elementos geossintéticos de alta resistência usados para reforço, tem como características principais, segundo a Maccaferri (2013b): alta resistência à tração, baixas deformações, boa interação com o solo, elevada resistência à degradação (microorganismos, elementos químicos, danos de instalação e radiação UV), além de possuir flexibilidade, baixo peso e facilidade de instalação.

As principais aplicações das geogrelhas, segundo a Maccaferri (2013a) são: reforço de taludes e muros de contenção; separação ou reforço em rodovias não pavimentadas e ferrovias; em conjunto com gabiões para construção de muros reforçados com controle de erosão e encontros de ponte; bem como reforço para execução de aterros sobre solos moles.

A Maccaferri (2013a) relata que existe uma tendência mundial para se classificar os geossintéticos, e com as geogrelhas, não é diferente. A norma NBR 12553 (2003) apresenta os tipos de geogrelhas e definições, como está disposto na Tabela 7.

Tabela 7 – Tipos de geogrelhas

TIPO DE GEOGRELHA	DESCRIÇÃO
Geogrelha GG (<i>Geogrid</i> - genérica)	Estrutura sintética, fabricada em forma de manta consistindo de uma rede de elementos integralmente conectados que podem ser unidos por extrusão, colagem ou entrelaçamento. Suas aberturas são maiores que seus elementos constituintes e são empregadas em aplicações de engenharia geotécnica, ambiental, hidráulica e viária.
Geogrelha Extrudada GGE (<i>Extruded geogrid</i>)	Produzida pelo estiramento uniaxial ou biaxial de uma estrutura extrudada integralmente.
Geogrelha Ligada GGB (<i>Bounded geogrid</i>)	Produzida através da união, usualmente em ângulos retos, de dois ou mais conjuntos de fios ou outros elementos.
Geogrelha Tecida GGW (<i>Woven geogrid</i>)	Produzida pela tecelagem, geralmente em ângulos retos, de dois ou mais conjuntos de fibras, fios, filamentos ou outros elementos.

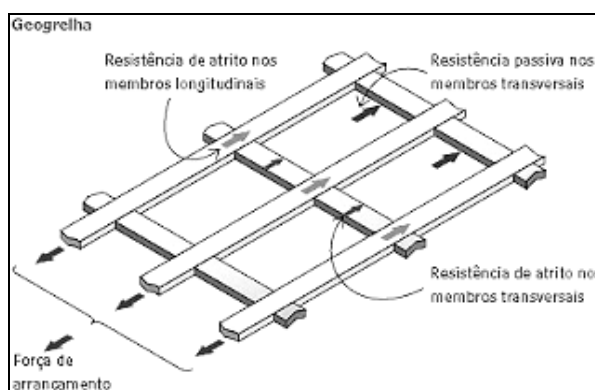
Fonte: Adaptado da NBR 12553 (2003) e Maccaferri (2013a).

Segundo a Maccaferri (2013a), as primeiras aplicações das grelhas como elementos de reforço de solo, foram com grelhas metálicas que eram sensíveis à corrosão. Com isso, a indústria motivou-se a desenvolver de grelhas a partir de materiais poliméricos que, sendo relativamente inertes, podem ser usados em ambientes agressivos. E ainda, as geogrelhas fabricadas com polímeros oferecem uma boa interação com o solo, resultado do efeito em conjunto do atrito entre solo e superfície da geogrelha e da resistência passiva fornecida pelo solo aos seus elementos transversais (MACCAFERRI, 2013a).

Os polímeros que são comumente incluídos na produção de geogrelhas são o polietileno de alta densidade (PEAD), o poliéster (PET) e o polipropileno (PP). As características destes polímeros estão especificadas na tabela 4, pág. 27, deste estudo. A Maccaferri (2013a) ressalta a importância do grau de cristalinidade dos polímeros. Ou seja, quando as macromoléculas se alinham em pequenas regiões, denominando-as cristalinas. Já as não alinhadas são chamadas de amorfas. Os polímeros contidos nas geogrelhas possuem as duas regiões, isto é, parte de sua estrutura é amorfa e parte é cristalina, assim, são estruturas semicristalinas (MACCAFERRI, 2013a).

As geogrelhas são compostas por elementos transversais e longitudinais, além das uniões entre os mesmos. Nas quais, os elementos transversais possuem a função de ancorar a geogrelha no solo envolvente. Já os elementos longitudinais funcionam como meio de interação por atrito na interface com o solo e transmitem a carga ao longo do comprimento da geogrelha (VERTEMATTI, 2004). A figura 16 ilustra estes elementos citados anteriormente.

Figura 15 – Elementos da geogrelha.

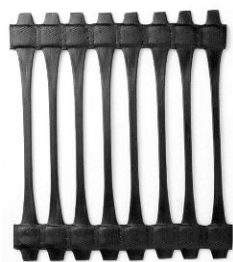


Fonte: Geogrelhas blogspot, (2009).

Vertematti (2004) afirma que a forma e configuração das geogrelhas pode variar de acordo com a sua função e o seu processo de fabricação. E ainda, a configuração da malha como, o tamanho dos orifícios, abertura, orientação, espessura, entre outros, tem grande

importância na aplicação da geogrelha. Portanto, cada geogrelha possui uma geometria e uma resistência à tração, bem como propriedades que a caracterizam. (VERTEMATTI, 2004). A figura 17 apresenta dois tipos de geogrelha de acordo com o processo de fabricação.

Figura 16 – Dois tipos de Geogrelha



(a) Extrudada



(b) Tecida

Fonte: (a) Ecosalix, (2017). (b) Inovageo, (2017).

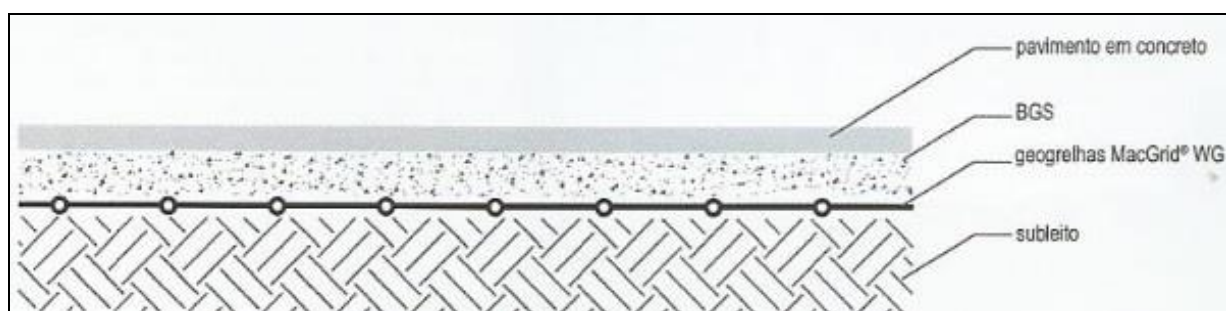
3.8 EXEMPLOS DE OBRAS REALIZADAS COM O USO DE GEOSSINTÉTICOS

São várias as obras que se utilizam da inclusão de geossintéticos para agregar maior resistência, segurança e economia. A seguir tem-se 3 exemplos de soluções aplicadas com a técnica de uso de geossintéticos.

3.8.1 Obra 1

A solução apresentada pela Maccaferri (2013b) para o reforço de base de um piso industrial foi a utilização de geogrelha MacGrid. A figura 18 apresenta um esquema do corte da base feita nesta obra.

Figura 17 – Corte da obra 1



Fonte: Maccaferri, (2013b).

Esta solução foi executada em uma obra de 14.400m² na cidade de São Paulo – SP, no ano de 2006. A figura 17 ilustra a execução desse reforço.

Figura 18 – Execução da Obra 1



(a) Solo (b) Geogrelha com BGS (c) Solo com geogrelha (d) Geogrelha

Fonte: Maccaferri, (2013b).

3.8.2 Obra 2

A obra 2 apresentada por este trabalho é a de reforço de base de pavimento com a utilização de geogrelha MacGrid apresentada pela Maccaferri (2013b).

A figura 18 mostra a execução desta solução.

Figura 19 – Execução da Obra 2



(a) Geogrelha

(b) Cobrimento da geogrelha com solo

Fonte: Maccaferri, (2013b).

Esta solução foi utilizada em uma obra com área de 13.000m², no ano 2000, na cidade de Curitiba – PR.

3.8.3 Obra 3

Segundo a Pedroni (2017b), a implantação da 2ª etapa da via de Interligação entre as rodovias Presidente Dutra e Carvalho Pinto – Av. Mário Covas – em São José dos Campos – SP utilizou várias soluções geotécnicas envolvendo geossintéticos para reforço de solos.

A obra foi dividida em duas etapas. No ano 2000, a primeira, com 1,5 km de extensão, utilizou-se e geogrelhas e drenos verticais como solução básica para a implantação dos aterros viários em áreas de solo mole (PEDRONI, 2017b).

Figura 20 – Execução da Obra 3



Fonte: Pedroni, (2017b).

A segunda etapa, com um trecho de 900 m em áreas de solos argilosos moles foram utilizadas soluções envolvendo geossintéticos de alta performance como geogrelhas e geocompostos que possibilitaram a execução da obra em um prazo curto e com um custo adequado, como na primeira etapa (PEDRONI, 2017b).

Figura 21 – Geogrelha de alta performance



Fonte: Pedroni, (2017b).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 CLASSIFICAÇÃO DO ESTUDO

4.1.1 Quanto aos objetivos

Quanto aos objetivos a serem atingidos, a pesquisa realizada pode ser classificada como exploratório-descritiva. Segundo Gil (2008), as pesquisas descritivas têm como objetivo primordial a descrição das características de determinada população ou fenômeno ou o estabelecimento de relações entre variáveis. Gil (2008), ainda afirma que este tipo de pesquisa se caracteriza pela utilização de técnicas padronizadas de coleta de dados. A metodologia deste trabalho consiste em tratar da técnica de reforço de solo com a utilização do geossintético do tipo greogrelha e mostrar os efeitos da interação solo-geossintético pelo ensaio de rampa.

De acordo com Gil (2008), as pesquisas exploratórias têm como principal finalidade desenvolver, esclarecer e modificar conceitos e ideias, tendo em vista a formulação de problemas mais precisos ou hipóteses pesquisáveis para estudos posteriores.

Para atender ao caráter exploratório-descritivo do trabalho foram utilizados procedimentos de pesquisa bibliográficos. Para Fonseca (2002), a pesquisa bibliográfica se constitui do levantamento de referências teóricas que já foram analisadas e publicadas em livros, web sites e artigos científicos. Por meio desta pesquisa, pôde-se conhecer mais sobre o assunto com relação ao reforço de solos com geossintéticos.

4.1.2 Quanto à natureza

A natureza desta pesquisa é caracterizada como aplicada. De acordo com Gerhardt e Silveira (2009), a pesquisa aplicada busca produzir conhecimentos para serem aplicados na prática, onde são direcionados à solução de problemas específicos. Além disso, este tipo aborda verdades e interesses sociais. É uma pesquisa que envolve interesse local e geral, pois busca promover conhecimento sobre a técnica de reforço de solo com geogrelha e a importância de se utilizar ensaios que melhor comprovem a resistência da interação solo-geossintético, estimulando assim, os profissionais da região de Mossoró e proximidades o uso de tecnologias favoráveis a segurança de obras geotécnicas.

4.1.3 Quanto à abordagem

A pesquisa é classificada quanto à abordagem como qualitativa e quantitativa. De acordo com Fonseca (2002), a pesquisa qualitativa aborda pontos da realidade que não são quantificados, possuindo assim uma subjetividade na mesma. Ainda segundo o mesmo autor, a pesquisa quantitativa possui resultados que são quantificados. E o mesmo ainda afirma: “A utilização conjunta da pesquisa qualitativa e quantitativa permite recolher mais informações do que se poderia conseguir isoladamente”. Com a análise quantitativa, pôde-se avaliar a resistência de interface solo-geogrelha através do ensaio de rampa.

4.2 MATERIAIS UTILIZADOS

4.2.1 Solo

A amostra de solo foi retirada no bairro Nova Betânia, na cidade de Mossoró – RN. Em uma obra de residência unifamiliar, em um condomínio particular, mais precisamente na escavação da piscina. Foram retirados 35 quilos de solo, a uma profundidade de 2,5m, para utilizar nos ensaios de caracterização do mesmo e no ensaio de rampa.

4.2.2 Geogrelha MacGrid WG 90.30

Segundo a Maccaferri (2014) a MacGrid WG é uma geogrelha tecida, fabricada a partir de filamentos de poliéster de super alta tenacidade que mobilizam elevada resistência à tração com baixos valores de alongamento. A tabela 8 apresenta as propriedades técnicas da geogrelha MacGrid WG 90.30.

Tabela 8 – Características técnicas da MacGrid WG 90

PROPRIEDADES MECÂNICAS	Un.	NORMAS	WG 90
Resistência longitudinal última (mín.)	kN/m	ASTM D 6637 NBR ISO 10319	90
Resistência transversal última (mín.)	kN/m		30
Alongamento na Resistência última	% +/- 1		10
Resistência à 2% de alongamento (mín.)	kN/m		17
Resistência à 6% de alongamento (mín.)	kN/m		43

Fonte: Adaptado de Maccaferri, (2014).

4.2.3 Equipamento para ensaio de rampa

O equipamento de ensaio de rampa possui recomendações e exigências segundo a norma NBR ISO 12957-2 (ABNT, 2013), na qual, está presente as dimensões e procedimentos que foram adotados para este trabalho. O equipamento de ensaio de rampa foi confeccionado com ferro em toda a sua estrutura (caixas, suporte e haste de inclinação) e com uma base de madeira com 15 mm de espessura. Segundo a mesma norma, as dimensões mínimas das caixas estão apresentadas na tabela 9.

Tabela 9 – Dimensões mínimas das caixas de ensaio.

	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Altura (mm)
CAIXA INFERIOR	325	400	50*
CAIXA SUPERIOR	300	300	50*

*ou $(7 \times D_{\text{máx dos grãos do solo)})$

Fonte: Adaptado da NBR ISO 12957-2, (2013).

Com isso, o equipamento possui duas caixas que servem para armazenar o solo compactado para o ensaio. As quais possuem dimensões diferentes. A caixa inferior, a maior, tem 50 cm de largura, 70 cm de comprimento e 5 cm de altura, e possui uma base de madeira com espessura de 1,5 cm. Esta caixa é fixada na estrutura de ferro. Já a caixa superior é móvel e possui 4 roletes acoplados para que seja possível o deslocamento entre caixas com o menor atrito possível. A mesma, tem dimensões menores que a superior. Tem largura de 50 cm, comprimento de 50 cm e altura de 5 cm. As caixas e a estrutura do equipamento estão dispostas na próxima figura 23.

Figura 22 – Equipamento de rampa.



Fonte: Autoria própria, (2017).

O ensaio foi realizado com a aparelhagem com base rígida, que de acordo com a NBR ISO 12957-2 (ABTN, 2013), consiste em uma placa rígida lisa articulada em uma extremidade, que pode ser equipada com um mecanismo que permita ao plano ser elevado suavemente a uma razão de $(3 \pm 0,5)$ graus por minuto.

Para melhor utilizar o equipamento, foi feita uma adaptação para se ensaiar os dois tipos apresentados na norma citada acima: base rígida ou caixa inferior. O equipamento foi confeccionado com caixa inferior fixa, porém, para se utilizar com base rígida, foi feita uma base de madeira com dimensões menores 1 a 2 mm que a caixa para que encaixasse de forma satisfatória, como mostra a figura 24 abaixo.

Figura 23 – Adaptação da caixa inferior para base rígida.



Fonte: Autoria própria, (2017).

O sistema de rolamento entre as caixas foi feito através de 4 roletes dispostos nos dois lados da caixa superior, no sentido do movimento. A figura 25 mostra os roletes utilizados.

Figura 24 – Roletes



Fonte: Autoria própria, (2017).

A NBR ISO 12957-2 (ABNT, 2013), recomenda que “o geossintético deve ser fixado à aparelhagem para limitar qualquer deslocamento relativo entre o geossintético e o plano”. A fixação do equipamento (figura 25) utilizado foi feita com três conjuntos que incluem, cada, um quadrado de madeira (5cm x 5cm) e uma porca e um parafuso, instalados nas bardas perpendiculares ao movimento do ensaio.

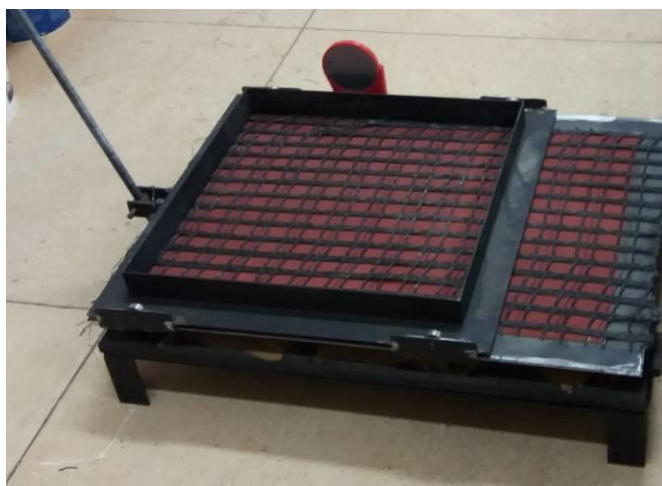
Figura 25 – Fixação da geogrelha.



Fonte: Autoria própria, (2017).

Como o método ensaio foi o de base rígida e o geossintético utilizado foi geogrelha, aplicou-se uma camada de folha de lixa na superfície da base de madeira, assim como recomenda a norma pelo seguinte item: “para geogrelhas e geotêxteis com estruturas abertas, o suporte usado deve ser solo ou lixa de esmeril abrasiva P100”. A figura 27 apresenta a instalação da lixa e da geogrelha na base do equipamento.

Figura 26 – Instalação da geogrelha sobre a base rígida com lixa P100.



Fonte: Autoria própria, (2017).

Após a instalação de todos os itens da base rígida, do corpo de prova (geogrelha) e da caixa superior, faz-se a compactação. Na qual, a norma NBR 12957, deixa de forma mais livre, como é explicado a seguir.

A aparelhagem deve ser preenchida com o solo proveniente do campo ou, alternativamente, com material selecionado entre as partes envolvidas. A preparação e a compactação do solo devem ser acordadas antes do início dos ensaios. (ABNT, 2013).

Portanto, a compactação foi feita em duas camadas de 2,5 cm de solo, com o auxílio do aparelho de compactar do ensaio de Marshal, de um peso e de uma tampa de madeira para diminuir a perda de material, como mostra a figura 28. Foram aplicados 30 golpes ao longo de cada parte da superfície.

Figura 27 – Compactação.



(a) Camada de solo.



(b) Aparelho de compactação.

Fonte: Autoria própria, (2017).

Ao finalizar a compactação, coloca-se a tampa, o peso que servirá de tensão confinante, a régua para medir o deslocamento horizontal entre as caixas e o medidor de ângulo para verificar a inclinação da rampa. Segundo a norma que rege este ensaio, a inclinação deve ser feita de forma gradual e a uma velocidade de 3 a 5 graus por minuto. O equipamento possui dispositivo que, ao rotacioná-lo, é gerada a inclinação da base e, conseqüentemente, a aparelhagem como um todo. Lembrando que deve-se verificar se o

ângulo inicial da base é 0° . Com isso, pode-se começar o ensaio. A figura 29 mostra o ensaio sendo realizado, com o equipamento a certa uma inclinação.

Figura 28 – Equipamento de rampa já inclinado.



Fonte: Autoria própria, (2017).

Por fim, o equipamento é inclinado até o momento em que a caixa superior se desloca 5 cm, segundo a NBR ISO 12957 (ABNT, 2013). E ainda, recomenda-se que deve desmontar a aparelhagem e remover o corpo de prova, registrando qualquer sinal de dano. Com isso, deve-se repetir o procedimento usando outro corpo de prova e a mesma tensão normal. Neste caso, foram ensaios 3 corpos de prova.

4.3 MÉTODOS PARA ANÁLISE

4.3.1 Caracterização geotécnica

4.3.1.1 Preparação das amostras para ensaios de caracterização

As amostras de solo foram preparadas segundo a NBR 6457:1896. Esta norma define dois tipos de amostra: com e sem secagem prévia. Os ensaios de caracterização que foram realizados durante este estudo, foram realizados com amostras que passaram por secagem prévia, sendo a recomendação desta norma. Com isso, é necessário desmanchar os torrões, sem quebrar os grãos, e fazer o quarteamento da amostra de solo, até que chegue ao peso que é necessário para os ensaios de caracterização.

Para os ensaios de Limite de Liquidez e Plasticidade foram preparadas duas amostras de 100 g cada, com o material que passa pela peneira 0,42 mm. Já para o ensaio de massa

específica dos grãos do solo que passam pela peneira 4,8 mm, deve ser recolhida uma amostra de 500 g do material passante nesta peneira.

Já para a determinação do teor de umidade, segundo o anexo A da NBR 6457 (ABNT, 1986), preparam-se 3 amostras com 30 g cada, do material sem torrões e com secagem prévia. E ainda, a análise granulométrica é feita com amostra de 1 kg para solos que possuam grãos de até 5mm analisados de forma visual. A figura 30 apresenta a amostra de solo depois de quarteada e sem torrões.

Figura 29 – Amostra de solo para os ensaios de caracterização.



Fonte: Autoria própria, (2017).

4.3.1.2 Teor de umidade higroscópica

O teor de umidade, como já citado, foram obtidos através do ensaio de laboratório presente no anexo da NBR 6457 (ABNT, 1986). Como o solo possuía grãos com dimensões entre 2mm e 20mm, foram separadas 3 amostras de 30 g, pesadas e depois levadas à estufa por 16h, a uma temperatura de 105°C e quando retiradas, pesou-se novamente para determinar o teor de umidade higroscópica.

Figura 30 – Teor de umidade higroscópica.



Fonte: Autoria própria, (2017).

4.3.1.3 Determinação do Limite de Liquidez

A amostra de 100 g preparada, como foi citada no item de preparação, foi colocada em um recipiente e adicionada água destilada, de forma gradual, e homogeneizando-a com uma palheta até que tivesse uma consistência que precisassem de, no mínimo, 35 golpes para fechar a ranhura padrão feita na amostra colocada no Aparelho de Casagrande.

Figura 31 – Amostra de solo no aparelho de Casa Grande.



Fonte: Autoria própria, (2017).

Esse procedimento foi repetido 5 vezes e, para cada ensaio, foi retirado e pesado um pouco da amostra para serem levadas à estufa a 105°C por 16h. Com isso, pesou-se novamente para verificar as umidades das 5 pequenas amostras.

4.3.1.4 Determinação do Limite de Plasticidade

Em um recipiente, foi colocada a amostra preparada de 100 g e adicionada água destilada aos poucos, e homogeneizando-a até que se chegasse a ter uma consistência plástica. Com isso, iniciou-se a moldagem de 5 cilindros, cada uma com uma pequena adição de água diferente da outra. De cada cilindro, com dimensões descritas pela norma NBR 7180 (ABNT, 1984) foram retiradas pequenas amostras dos cilindros para serem levadas à estufa a uma temperatura de 105°C por 16h e então calculado a umidade pela média das umidades das amostras. Vale lembrar que as frações de solos de cada cilindro foram pesadas antes e depois de irem para estufa.

Figura 32 – Amostras para determinação do Limite de Plasticidade



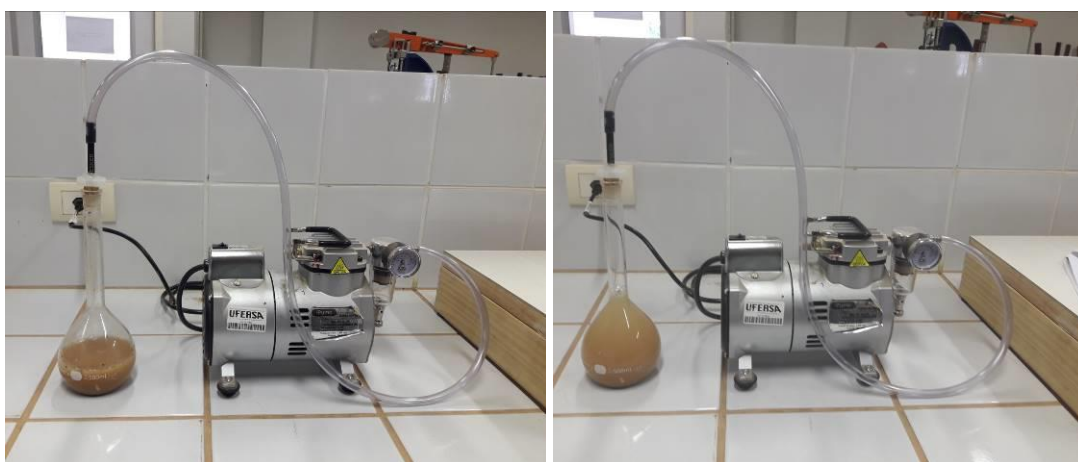
(a) Moldagem do cilindro (b) Fração do cilindro de solo retira para pesagem

Fonte: Autoria própria, (2017).

4.3.1.5 Massa específica dos grãos

Divida a amostra prepara em duas frações de 50g, para realizar o ensaio duas vezes com um picnômetro de 500ml. Primeiramente, verificou-se a temperatura da água e a coloca no picnômetro até a marca de referência, em seguida, pesou-se o conjunto. Com isso, retira-se aproximadamente 2/3 da quantidade de água e adicionado a amostra de solo de 50 g. E ainda, o conjunto foi agitado e colocado no equipamento que consiga deixá-lo ao vácuo. Aguardou-se 15 minutos, adicionou-se mais água sem agitar e, novamente submete-se o conjunto ao vácuo. Após mais 15 minutos, completou-se o picnômetro com água até a marca de referência e coloca no vácuo por mais 15 minutos. A figura 35 mostra o conjunto submetido ao vácuo.

Figura 33 – Uso do picnômetro



(a) Solo com pouca água.

(b) Solo com água até a marca.

Fonte: Autoria própria, (2017).

Ao fim dos 45 minutos de ensaio, o conjunto (picnômetro, solo e água) foi pesado novamente. Repetindo o ensaio para a outra parte da amostra.

4.3.1.6 Análise Granulométrica

Peneirou-se a amostra de solo preparada na peneira 2,0 mm. O material retido nesta peneira foi utilizado no peneiramento grosso do solo e do que passou foi retida quantidade suficiente para a realização do peneiramento fino.

O peneiramento grosso foi realizado utilizando-se a quantidade de solo que ficou retida na peneira 10 (2,0 mm), mostrado na figura 35. Com isso, lavou-se este material, colocando-o em seguida na estufa por 16h, a uma temperatura de 105°C. Em seguida, colocou-se as peneiras de aberturas maiores e igual a de 2,0 mm uma sobre as outra com as aberturas das malhas decrescendo de cima para baixo, colocando-se o fundo para recolher os grãos passantes. Com o conjunto de peneiras montado, agitou-se manualmente por alguns minutos suficientes para peneirar toda amostra. Só então, pesou-se a fração de solo retida em cada peneira, até chegar a de 2,0 mm.

Figura 34 – Material retido na peneira 10



(a) Material seco

(b) Material lavado

Fonte: Autoria própria, (2017).

O peneiramento fino foi realizado utilizando-se cerca 120 g de solo, descritos na norma NBR 7181 (ABNT, 1984), passante na peneira 10. Esta amostra foi lavada na peneira 200 (0,075 mm) e em seguida colocada na estufa por 16h, a uma temperatura de 105°C.

A figura 36 a seguir mostra o material retido na peneira 10 e na peneira 200, após as 16h na estufa.

Figura 35 – Material seco.



Fonte: Autoria própria, (2017).

Assim, empilhou-se as peneiras de aberturas compreendidas entre as peneiras 10 (2,0mm) e 200 (0,075mm), colocou-se o solo seco no conjunto de peneiras e agitou-se manualmente (Figura 37). Por fim, pesou-se a fração de solo retida em cada peneira.

Figura 36 – Peneiramento fino.



Fonte: Autoria própria, (2017).

4.3.2 Ensaio de rampa

O método e os materiais utilizados, bem como o equipamento do ensaio de rampa foram abordados no item 3.5 deste estudo. Este ensaio foi realizado confinando uma amostra de solo em uma caixa que se apoia sobre a face do geossintético preso a uma base rígida. O conjunto estava inicialmente na horizontal e a inclinação do plano foi gradualmente aumentando, até que ocorreu o deslizamento da caixa superior ao longo da interface.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

5.1.1 Teor de umidade higroscópica

O teor de umidade higroscópica do solo foi determinado através de seu peso úmido e seu peso seco, como calculado na equação 6, proveniente da NBR 6456 (ABNT, 1986):

$$h = \frac{M_1 - M_2}{M_2 - M_3} \times 100 \quad (6)$$

Onde,

M_1 = massa do solo úmido com tara do recipiente;

M_2 = massa do solo seco com tara do recipiente;

M_3 = tara do recipiente.

Calculou-se a umidade de cada amostra ensaiada e fez a média entre elas. Assim, o solo apresentou um teor de umidade higroscópica igual a 2,41% (Tabela 10).

Tabela 10 – Resultados obtidos para o teor de umidade higroscópica da amostra.

Determinação da Umidade Higroscópica (hig)			
Dados da Cápsula nº	1	2	3
Peso bruto úmido (g)	30,08	30,08	30,08
Peso bruto seco (g)	29,58	29,50	29,48
Peso da cápsula (g)	6,39	5,78	6,78
Peso da água (g)	0,50	0,58	0,60
Peso do solo seco (g)	23,19	23,72	22,69
Teor de umidade (%)	2,14	2,43	2,65
hig = Média das umidades	2,41		

Fonte: Autoria própria, (2017).

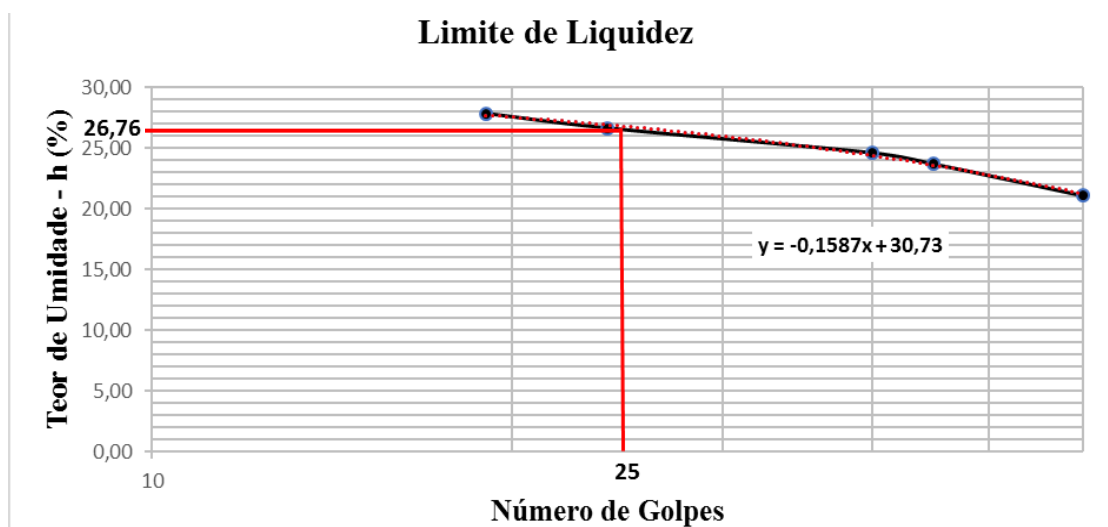
5.1.2 Determinação do Limite de Liquidez

O Limite de Liquidez foi encontrado através de um gráfico em escala logarítmica, no qual os números de golpes estão no eixo x e o as umidades encontradas estão no eixo y,

colocou-se os dados para as 5 amostras ensaiadas no equipamento de Casagrande, encontrou-se a equação que define o comportamento da umidade das amostras e, por fim, encontrou a umidade referente a 25 golpes.

O gráfico 1 apresenta a linha de tendência que corresponde aos dados do ensaio referentes ao número de golpes e a umidade de cada uma das 5 amostras ensaiadas. Assim, encontrou-se a umidade que corresponde aos 25 golpes que pede a norma.

Gráfico 1 – Limite de Liquidez da amostra de solo.



Fonte: Autoria própria, (2017).

Os resultados encontrados para a amostra de solo estão indicados na tabela 11, e o valor obtido para o Limite de Liquidez foi de 26,76%. Para os cálculos dos teores de umidade de cada amostra, foi utilizada a equação 6, anterior.

Tabela 11 – Resultados encontrados do Limite de Liquidez da amostra de solo.

LIMITE DE LIQUIDEZ				
M3 (g)	M1 (g)	GOLPES	M2 (g)	h (%)
5,913	9,572	60	8,935	21,08
6,487	9,266	45	8,734	23,68
5,222	8,905	40	8,178	24,59
5,781	10,659	24	9,633	26,64
6,811	11,046	19	10,124	27,83
-	-	25	-	26,76

Fonte: Autoria própria.

5.1.3 Determinação do Limite de Plasticidade

Limite de Plasticidade foi obtido realizando-se a média entre as umidades das amostras retiradas de cada um dos 5 cilindros moldados do solo ensaiado e descartou-se, a amostra que apresentou variação de 5% abaixo ou acima da média, tendo que restar, no mínimo, 3 amostras.

Os resultados encontrados para a amostra de solo estão apresentados na tabela 12 abaixo, encontrando-se um Limite de Plasticidade de 15,11%. Para os cálculos de teor de umidade de cada amostra, foi utilizada a equação 6, citada acima.

Tabela 12 – Resultados do limite de plasticidade

LIMITE DE PLASTICIDADE						
M₃ (g)	M₁ (g)	M₂ (g)	1º teste		2º teste	
			h (%)	Desvio da média	h (%)	Desvio da média
5,742	6,371	6,292	14,36	0,64	14,36	-0,74
6,165	6,723	6,652	14,58	0,42	-	-
5,833	6,374	6,306	14,38	0,62	14,38	-0,73
6,434	6,96	6,888	15,86	0,86	15,86	0,75
6,234	6,878	6,79	15,83	0,83	15,83	0,72
Média			15,00	-	15,11	-
5% da média			0,75	-	0,76	-

Fonte: Autoria própria, 2017.

5.1.4 Determinação do índice de plasticidade

Com os valores dos Limites de Liquidez e de Plasticidade, obteve-se o Índice de Plasticidade de um material através da equação 7, pela norma NBR 7180 (ABNT, 1984).

$$IP = LL - LP \quad (7)$$

Onde,

LL = Limite de Liquidez;

LP = Limite de Plasticidade;

IP = Índice de Plasticidade.

Os valores obtidos dos limites e do Índice de Plasticidade estão dispostos na tabela 13.

Tabela 13 – Índice de Plasticidade.

ÍNDICE DE PLASTICIDADE			
LL (%)	LP (%)	IP (%)	CLASSIFICAÇÃO
26,76	15,11	11,65	Média plasticidade

Fonte: Autoria própria, (2017).

Como o Índice de Plasticidade deu entre 7% e 15%, o solo pode ser considerado de média plasticidade, calculado pela equação a seguir.

5.1.5 Massa Específica dos grãos

A massa específica dos grãos do solo foi calculada com a média da massa específica dos grãos de duas amostras de 50g que foram ensaiadas, utilizando a equação 8.

$$\delta = \frac{M_1 \times (100/100 + h)}{[M_1 \times (100/100 + h)] + M_3 - M_2} \times \delta_T \quad (8)$$

Onde,

M1 = massa do solo úmido;

M2 = massa do conjunto (picnômetro + solo + água);

M3 = massa do picnômetro cheio de água até a marca de referência;

h = umidade inicial da amostra;

δ_T = massa específica da água, na temperatura T de ensaio.

Os resultados encontrados para os materiais então apresentado na tabela 14.

Tabela 14 – Massa específica dos grãos do solo.

MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS						
M ₁ (g)	M ₃ (g)	T (°C)	δ_T (g/cm ³)	h(%)	M ₂ (g)	δ (g/cm ³)
50,02	659	27,1	0,9965	3,00	689,33	2,65
50,01	659,06	26,1	0,9968	3,00	689,75	2,71
Média						2,68

Fonte: Autoria própria, (2017).

Vale enfatizar que os dados como: as massas específicas da água referente a sua temperatura na hora do ensaio para cada amostra foram retiradas da tabela da norma NBR 6508 (ABNT, 1984). E ainda, definiu-se previamente o teor de umidade. Com isso, a massa específica dos grãos do solo ensaio pôde ser calculada, que é 2,68 g/cm³.

5.1.6 Análise Granulométrica

Os dados referentes ao peneiramento se encontram na tabela 15 abaixo. O peneiramento foi feito em duas etapas: o grosso e o fino, segundo a norma NBR 7181:1984.

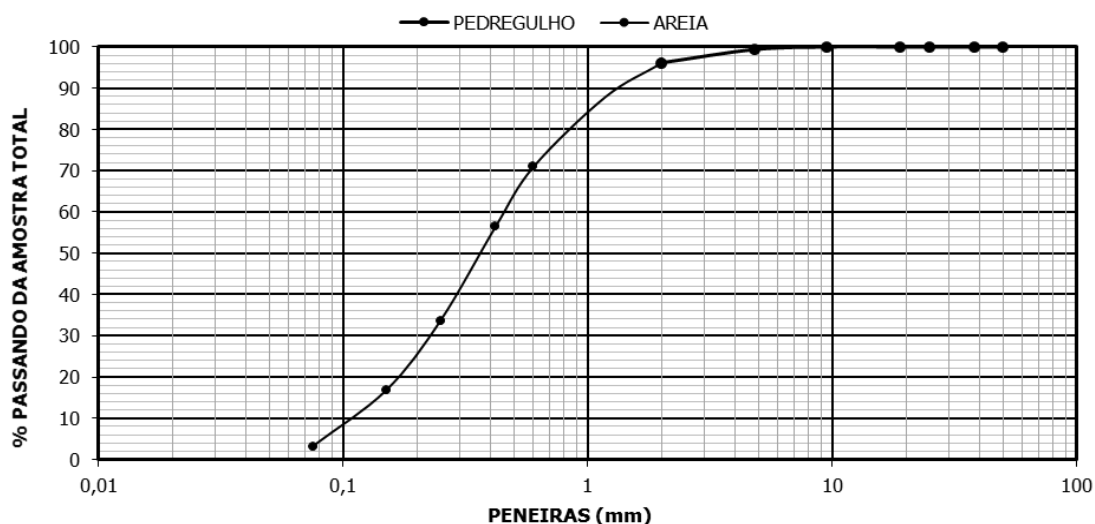
Tabela 15 – Peneiramento.

PENEIRAMENTO GROSSO						
Peneira		Retida da Amostra Total			% Passante Total	
ASTM	mm	Retido	% Ret.	% Acumulada		
2"	50	0,00	0,00	0,00	100,00	
1 1/2"	38	0,00	0,00	0,00	100,00	
1"	25	0,00	0,00	0,00	100,00	
3/4"	19	0,00	0,00	0,00	100,00	
3/8"	9,50	0,00	0,00	0,00	100,00	
N.º 4	4,8	7,84	0,62	0,62	99,38	
N.º 10	2,0	41,80	3,29	3,91	96,09	
PENEIRAMENTO FINO						
Amostra Parcial Úmida (g)			120,00		% Passante Parcial	% Passante Total
Amostra Parcial Seca (g)			82,99			
Peneira		Retida da Amostra Parcial				
ASTM	mm	Massa (g)	% Ret.	% Acumulada		
16	1,2	7,08	8,53	8,53	91,47	87,89
30	0,6	14,62	17,62	26,15	73,85	70,97
40	0,42	12,52	15,09	41,23	58,77	56,47
60	0,25	19,68	23,71	64,95	35,05	33,68
100	0,15	14,57	17,56	82,50	17,50	16,81
200	0,075	11,76	14,17	96,67	3,33	3,20

Fonte: Autoria própria, (2017).

O resultado final do ensaio de análise granulométrica é mostrado no gráfico 2, como recomenda a NBR 7181 (ABNT, 1984). No qual, o eixo das abcissas apresenta os diâmetros das partículas, em escala logarítmica. Já no eixo das coordenadas, estão dispostas as porcentagens das partículas passantes nos diâmetros indicados, em escala aritmética.

Gráfico 2 – Análise Granulométrica



Fonte: Autoria própria, (2017).

Para melhor dispor os resultados obtidos neste ensaio, a tabela 18 apresenta um resumo da análise granulométrica do solo ensaiado neste trabalho.

Tabela 16 – Resumo da granulometria.

Descrição		Massa (g)	
A) Amostra total úmida		1.300,00	
B) Solo seco retido pela peneira nº 10		41,80	
C) Solo úmido passante na peneira nº 10 (A-B)		1.258,20	
D) Solo seco passante na peneira nº 10 $\left(\frac{C}{1 + h_{ig}}\right)$		1.228,61	
E) Amostra total seca (B+D)		1.270,41	
RESUMO DA GRANULOMETRIA	Pedregulho		3,91%
	Areia	Grossa	25,13%
		Média	37,28%
		Fina	30,49%
	Silte + Argila		3,20%

Fonte: Autoria própria, (2017).

5.2 ENSAIO DE RAMPA

As tensões atuantes no ensaio de rampa realizado são essencialmente as componentes da tensão normal (σ) e da tensão cisalhante (τ) no plano da interface solo-geogrelha, provenientes do peso do conjunto solo-caixa superior.

Ensaiou-se, uma vez, somente a interface do solo para se comparar com a utilização da geogrelha. Os resultados apresentados na ruptura estão dispostos na tabela 17.

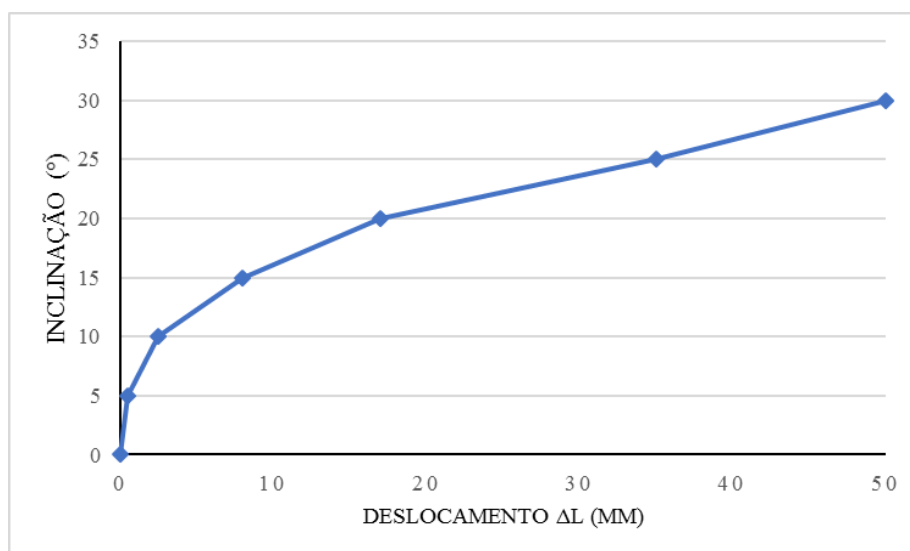
Tabela 17 – Resultados dos ensaios de rampa na interface do solo.

ENSAIO	β (°)	$\Delta l_{\text{máx}}$ (mm)	Dados na ruptura			
			σ (kPa)	τ (kPa)	τ/σ	Φ_{gp} (°)
1	30	50	0,894	0,6288	0,7034	35,12

Fonte: Autoria própria, (2017).

O gráfico 3 apresenta os dados dos deslocamentos da caixa superior preenchida com amostra de solo a medida em que se aumenta gradativamente a inclinação da rampa.

Gráfico 3 – Ensaio de rampa só com a amostra de solo.



Fonte: Autoria própria, (2017).

A NBR ISO 12957-2 (ABNT, 2013) recomenda repetir o ensaio usando outro corpo de prova e a mesma tensão normal. Um novo corpo de prova deve ser usado para cada ensaio. Por isso, foram realizados 3 ensaios com 3 corpos de prova da mesma geogrelha e aplicada a mesma tensão.

A tabela 18 mostra os resultados dos ensaios de rampa realizados com a geogrelha MacGrid WG 90.30.

Tabela 18 – Resultados dos ensaios de rampa na interface solo-geogrelha.

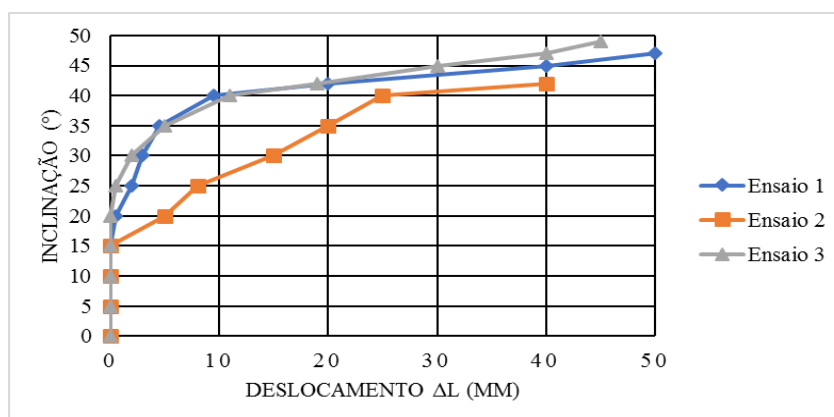
ENSAIO	β (°)	$\Delta l_{\text{máx}}$ (mm)	Dados na ruptura			
			σ (kPa)	τ (kPa)	τ/σ	φ_{gp} (°)
1	47	50	0,704	0,9197	1,3064	52,57
2	42	40	0,767	0,8415	1,0971	47,65
3	49	45	0,677	0,9491	1,4019	54,50
Média da inclinação β (°)		46	Desvio padrão da inclinação β (°)	2,9439	Coeficiente de Variação (%)	6,3997

Fonte: Autoria própria, (2017).

Observa-se que o ângulo de inclinação da rampa na ruptura variou entre 42 e 49°. A média dos ângulos calculada é de 46° com desvio padrão de, aproximadamente, 2,94 e coeficiente de variação de apenas 6,4°. Portanto, conclui-se que os ensaios apresentam informações coerentes quanto ao valor de ângulo de inclinação correspondente à ruptura, confirmando que o equipamento é confiável.

O gráfico 4 apresenta as curvas de ângulo de inclinação por deslocamento da caixa superior, para a mesma tensão de confinamento. E ainda, dispõe dos três ensaios de rampa repetido para o mesmo tipo de geogrelha e tensão confinante. O conjunto de curvas dos ensaios solo-geogrelha apresenta uma dispersão um pouco acentuada quanto ao deslocamento máximo, porém uma repetibilidade aceitável quanto ao ângulo de inclinação de ruptura.

Gráfico 4 – Resultados dos ensaios de rampa da interface solo-geogrelha.



Fonte: Autoria própria, (2017).

O ensaio 1 foi selecionado (Figura 38), pois indicou o ângulo de inclinação na ruptura de 47° , ou seja, mais próximo da média dos 3 ensaios realizados que foi de 46° .

Figura 37 – Ensaio 1 na ruptura.



(a) Ângulo.



(b) Ruptura.

Fonte: Autoria própria, (2017).

Este trabalho estudou ensaios de rampa em dois tipos diferentes de interface com base rígida: solo e solo-geogrelha. O ensaio de interface da amostra solo teve como objetivo a avaliação do equipamento e a comparação com os ensaios que utilizaram a geogrelha, através dos parâmetros na ruptura.

6. CONCLUSÕES

O trabalho visou contribuir para a obtenção de maiores informações em relação à utilização de geossintéticos para reforço de solo, apresentando resultados melhores com a inclusão deste material do que o solo isolado ou soluções convencionais. Buscou ainda mostrar a importância do estudo de interfaces solo-geossintético, com o foco na utilização de geogrelha.

Conclui-se, concordando com Palmeira (1999b), que a inclusão de geossintéticos na técnica de solo reforçado deve passar por um aumento no uso desta técnica, trazendo um menor impacto ambiental através da redução do consumo de material de aterro e da remoção do solo de fundação, utilizando materiais disponíveis no local. Com isso, acarreta um menor tempo de execução, bem como uma redução de custo. Outro benefício é um melhor aproveitamento dos espaços disponíveis na obra, em quase todos os tipos de solo.

Dentro deste contexto, abordou-se inicialmente os tipos de geossintéticos, suas características, composições e aplicações. Como motivação ao tema, muitos autores relatam que a inclusão de geossintéticos influenciam na melhoria da capacidade de carga de solos, bem como, são soluções promissoras nos inúmeros trabalhos desenvolvidos com modelos reduzidos. Ou seja, para uma dada situação, um modelo físico reduzido é construído e testado a fim de que os resultados adquiridos possam ser convertidos para as condições de maior escala. Embora, seja necessário verificar as condições de similaridade.

Para a verificação da resistência de interface são geralmente utilizados os ensaios de cisalhamento direto, arrancamento e rampa. Para escolher o ensaio mais adequado para a situação que se deseja estudar, é necessário verificar o tipo de geossintético, a sua função e a solicitação presente no solo. Portanto, confeccionou-se um equipamento capaz de realizar o ensaio de rampa para uma dimensão média de geossintético, ou seja, 0,50 m x 0,50 m.

O modelo do equipamento de ensaio de rampa foi construído e testado para a verificação e cálculo do atrito entre caixas, ou entre base rígida e caixa superior, embora com limite de utilização dos pesos de confinamento. Além disso, os ensaios com geogrelha foram repetidos para avaliar a confiabilidade do equipamento e da metodologia do ensaio de rampa. Assim, foram ensaiados 2 tipos de interfaces: solo e solo-geogrelha. Os resultados dos ensaios de rampa com base rígida, foram interpretados e analisados em termos de resistência das interfaces solo-geossintético.

Ainda sobre a aparelhagem, a mesma é formada por componentes simples, de fácil operação e manutenção. É constituído por duas caixas de ensaio, superior e inferior, que

permitem a execução de ensaios de rampa em interfaces solo-solo, solo-rocha, solo-base rígida, todos com uso ou não de geossintéticos. O sistema de roletes da caixa superior sobre a inferior apresentou-se eficiente, pois garantiu o não deslocamento lateral e a condição de atrito desprezível.

O solo tomado como amostra foi caracterizado através de ensaios referentes a norma NBR 6457 (ABNT, 1986). Foi classificado segundo a sua análise granulométrica como sendo um solo arenoso com presença de argila. É um solo bem graduado, pois possui um coeficiente de não uniformidade de 3,75, bem como um coeficiente de curvatura de 1,16. E ainda, possui uma média plasticidade.

Com os ensaios de rampa de base rígida realizados com solo e com solo-geossintético, conclui-se que a introdução de geogrelha no reforço de solo aumenta a capacidade de suporte do maciço, como vários autores relatam. O aumento de resistência de interface se deu na ordem de 31,43% com a inclusão da geogrelha. Quanto ao equipamento, verificou-se a grande facilidade de construção, manutenção e utilização do mesmo. Portanto, é importante a verificação da resistência de interface através do ensaio de rampa (de plano inclinado), principalmente para taludes íngremes.

As contribuições deste estudo para o município de Mossoró são os conhecimentos oferecidos sobre o comportamento da interface solo-geogrelha com uma pequena amostra do material disponível no bairro, expor as características dos mesmos e seus parâmetros de resistência na interface segundo a ABNT NBR ISO 12957-2:2013. E incentivar maiores estudos sobre a interação do solo da região com os geossintéticos.

Por fim, vale salientar as sugestões para trabalhos futuros como: a adaptação da aparelhagem do ensaio de rampa para os ensaios de cisalhamento direto (convencional e inclinado) e o de arrancamento; análise de resistência de interfaces utilizando diferentes tipos de geossintéticos e outros tipos de solos; estudar a fluência de geossintéticos em ensaios de rampa; comparar os ensaios de interface como cisalhamento direto, rampa e arrancamento com este mesmo equipamento e melhoramento da aparelhagem utilizada neste trabalho.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 10319: Geossintéticos – Ensaio de tração faixa larga**. 2013. 11p.

_____. **NBR ISO 12553: Geossintéticos – Terminologia**. 2003. 3p.

_____. **NBR 15226: Geossintéticos – Determinação do comportamento em deformação e na ruptura, por fluência sob tração não confinada**. 2005. 14p.

_____. **NBR 6457: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. 1984. 9p.

_____. **NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez**. 1986. 6p.

_____. **NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica**. 1984. 8p.

_____. **NBR 7180: Solo - Determinação do limite de liquidez**. 1984. 3p.

_____. **NBR 7181: Solo - Análise granulométrica**. 1984. 13p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOSSINTÉTICOS. **História**. IGS Brasil, 2017. Disponível em: <<http://igsbrasil.org.br/a-igs-brasil/historia>>. Acesso em 20 set. 2017.

_____. **Os Geossintéticos**. IGS Brasil, 2017. Disponível em: <<http://igsbrasil.org.br/os-geossinteticos>>. Acesso em 20 jul. 2017.

BARRETT, J. R. **Use of plastic filters in coastal structures**. Proc. of 10th Int. Conf. on Coastal Engineering. Tokyo, pp. 1048 – 1067. Disponível em: <<https://icce-ojs-tamu.tdl.org/icce/index.php/icce/article/viewFile/2475/2140>>. Acesso em: 17 set. 2017.

CABREIRA, Vinicius. **Material de Apoio à Disciplina de Análise Instrumental Aplicada a Polímeros**. UFRGS. 2009. Disponível em: <https://chasqueweb.ufrgs.br/~ruth.santana/analise_instrumental/index.html>. Acesso em: 22 ago. 2017.

CARAM, Rubens. **Estrutura e propriedades dos materiais: materiais poliméricos**. Unicamp. 2017. Disponível em: <<http://www.fem.unicamp.br/~caram/8.%20MATERIAIS%20POLIMERICOS%20GRAD.pdf>>. Acesso em: 22 ago. 2017.

CARNEIRO, J. R. C. **Durabilidade de materiais geossintéticos em estruturas de carácter ambiental – a importância da incorporação de aditivos químicos.** Universidade do Porto, 2009. 533p.

COLIN, J. F.; JONES, P. **Earth reinforcement and soil structures.** T. Telford: 1996. 379p.

CONSTRUÇÃO MERCADO. **Tipos de geossintéticos.** Revista Construção Mercado. Editora Pini. Edição 93, 2009. Disponível em: < <http://construcaomercado.pini.com.br/negocios-incorporacao-construcao/93/artigo283605-1.aspx> >. Acesso em: 30 jul. 2017.

COSTA, A. H., et al. **Versatilidade dos geossintéticos aplicada à engenharia.** XII SEGeT – Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia. AEDB, 2015. 13p.

DAS, B. M. **Fundamentos de engenharia geotécnica.** 6 ed. São Paulo: Thomson Learning, 2007. 562p.

GIL, A.C. **Métodos e técnicas de pesquisa social.** 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008. 200p.

INGOLD, T.S. **Geotextiles: Specification and Testing. Ground Engineering.** Journal Geotechnical Engineering, ASCE, v.6, n.109, p. 45-51, 1983.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 12957-2: Geotextiles and Geotextiles Related Products.** Genebra 2005.

JEWELL, R.A. **Soil Reinforcement with Geotextiles.** CIRIA Special Publication 123, Thomas Telford: 1996. 332 p.

KOERNER, R.M. **Designing with Geosynthetics.** New Jersey: Prentice-Hall, 1998. 761p.

_____. **Geotextiles: From Design to Applications.** Elsevier, WP Whoodhead Publishing, 2016. 618p.

MACCAFERRI. **Reforço de solos – Manual técnico.** Maccaferri do Brasil, 2013a. 168p.

_____. **Reforço e estabilização de solos: necessidades e soluções.** Maccaferri do Brasil, 2013b. 23p.

MARQUES, Luísa. **O que são polímeros e porque são interessantes?** Universidade de Évora, Departamento e Centro de Química. 3p. Disponível em: < <http://www.videos.uevora.pt/oquesaopolimeros.pdf> >. Acesso em: 20 set. 2017.

MELLO, L.G.R., LIMA Jr., N.R., PALMEIRA, E.M. **Estudo da Interação entre Interfaces de Solo e Geossintético em Taludes de Áreas de Disposição de Resíduos**. Solos e Rochas, V.26, pp.19-352, 2003.

PALMEIRA, E. M. **Aterros Reforçados com Geossintéticos Sobre Solos Moles**. Geossintéticos, v.2. Rio de Janeiro, 1999a.

_____. **Solo Reforçado**. São Paulo: Huesker LTDA, 1999b. 16 p.

_____. **Embankments**. Book Geosynthetic Applications, ed. Thomas, cap. 10, 2002.

PEDRONI, Bruno. **Panorama do mercado de Geossintéticos**. Geosynthetic. 2017. Disponível em: < <http://www.geosynthetic.net.br/panorama-do-mercado-de-geossinteticos/> >. Acesso em: 12 ago. 2017.

_____. **Caso de Obra – Aterro sobre Solo Mole na Interligação das rodovias Dutra e Carvalho Pinto**. Geosynthetic. 2017b. Disponível em: < <http://www.geosynthetic.net.br/caso-de-obra-aterro-sobre-solo-mole/> >. Acesso em: 12 ago. 2017.

SIEIRA, A.C.C.F., **Estudo Experimental dos Mecanismos de Interação Solo-Geogrelha**, Departamento de Engenharia Civil, Rio de Janeiro: PUC-Rio, 2003. 360p.

SOCIEDADE INTERNACIONAL DE GEOSSINTÉTICOS. **Os geossintéticos**. IGS Brasil. Disponível em: <<http://igsbrasil.org.br/os-geossinteticos>>. Acesso em: 17 jul. 2017.

VERTEMATTI, J. C. **Curso básico de geotêxteis**. Comitê Técnico Geotêxtil – CTG. 1 ed. Rio de Janeiro: Rooka'z, 2001. 91p.

_____. **Manual Brasileiro de Geossintéticos**. São Paulo: Edgard Blucher, 2004. 413p.

VIDAL, H. **La petite de la terre armée**. Terre Armée, France, 1986. Disponível em: < [http://www.terre-armee.fr/appli/internet/TerreArmee/WebTerreArmeeFrance.nsf/vu_SYS_CONT_AllByDocID/EE6B6B3DFABE301AC125755400521453/\\$FILE/petite-histoire-1986-11.pdf](http://www.terre-armee.fr/appli/internet/TerreArmee/WebTerreArmeeFrance.nsf/vu_SYS_CONT_AllByDocID/EE6B6B3DFABE301AC125755400521453/$FILE/petite-histoire-1986-11.pdf) >. Acesso em 17 set. 2017.

WHEELER, P. **Earth bound: reinforced soil**. London, 1996, U. K., pp.3-5.