

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SERGIPE
CAMPUS ARACAJU
DIRETORIA DE ENSINO
COORDENADORIA DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

MAYARA LUANA DE JESUS SANTOS

ANÁLISE NUMÉRICA DE GEOGRELHAS APLICADAS COMO REFORÇO DE
BASE DE FUNDAÇÕES RASAS

MONOGRAFIA

ARACAJU
2021

MAYARA LUANA DE JESUS SANTOS

**ANÁLISE NUMÉRICA DE GEOGRELHAS APLICADAS COMO
REFORÇO DE BASE DE FUNDAÇÕES RASAS**

Monografia apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel, da Coordenação do Curso de Engenharia Civil, do Instituto Federal de Sergipe – Campus Aracaju.

Orientador: Prof. MSc. Emiliana de Souza Rezende Guedes.

**ARACAJU
2021**

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária Geocelly Oliveira Gambardella / CRB-5 1815,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Santos, Mayara Luana de Jesus

S237a Análise numérica de geogrelhas aplicadas como reforço de base de fundações rasas. / Mayara Luana de Jesus Santos. - Aracaju, 2021.

62 f. : il.

Orientadora: Profª Ma. Emiliana de Souza Rezende Guedes.
Monografia (Graduação - Bacharelado em Engenharia Civil.) - Instituto Federal de Sergipe, 2021.

1. Solo Reforçado. 2. Análise Numérica. 3. Geogrelha. 4. Optum G2. 5. Fundação Rasa. I. Guedes, Emiliana de Souza Rezende. II. Título.

CDU 624.15

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SERGIPE CAMPUS ARACAJU**

CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

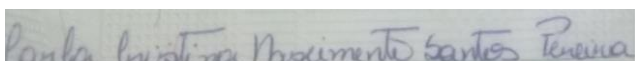
TERMO DE APROVAÇÃO

Título da Monografia Nº 190

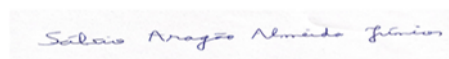
**ANÁLISE NUMÉRICA DE GEOGRELHAS APLICADAS COMO REFORÇO DE
BASE DE FUNDAÇÕES RASAS**

MAYARA LUANA DE JESUS SANTOS

Esta monografia foi apresentada às 20 h do dia 13 de abril de 2021 como requisito parcial para a obtenção do título de BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL. A candidata foi arguida pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.



Prof^ª. Dr^ª. Carla Cristina Nascimento Santos
Pereira
(IFS-Campus Aracaju)



Prof. Prof. MSc. Sálvio Aragão
Almeida Júnior



Prof^ª M.Sc. Emiliana de Souza Rezende Guedes
(IFS – Campus Aracaju)
Orientador



Prof. Dr. Pablo Gleydson de Sousa
(IFS – Campus Aracaju)
Coordenador da COEC

Dedico este trabalho aos meus pais, Seu Carlos e mestres, que fizeram com que eu chegasse mais longe do que eu pudesse imaginar.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, quero agradecer a Deus e a Nossa Senhora de Guadalupe por ter me dado força e saúde ao longo dessa caminhada, ter renovado minha energia em momentos que eu achava que não havia mais e iluminado a minha mente.

Agradeço aos meus pais, Irailde e Marivaldo, que sempre se esforçaram para me proporcionar o melhor estudo e cuidaram tão bem de mim em dias difíceis. Agradeço a minha irmã Mariana por se fazer presente, me propiciando momentos de descontração e tranquilidade. Também sou grata a todos os meus familiares (tias, avós, avôs, madrinha, primas), pelo apoio que sempre me deram durante toda minha vida.

Ao meu namorado Yuri, pela compreensão e parceria durante toda a graduação. A todos os meus amigos do curso, em especial Igor, Bárbara e Geverson, que compartilharam comigo inúmeros desafios durante essa jornada. Agradeço também aos meus colegas de estágio na EMURB e ao meu chefe Vilson Souza – um exemplo de profissional e de ser humano.

Faço também um agradecimento muito especial a Sálvio Aragão Júnior, que dedicou tanto tempo para me orientar nesse trabalho e sempre se mostrou solícito. Sou muita grata a tudo que você fez por mim. Sem palavras para agradecer tanto cuidado e paciência comigo!

Neste período de conclusão de curso tão conturbado e cheio de desafios, Deus colocou pessoas na minha vida para me auxiliar, tornando uma grande rede de apoio que sou muito grata: a Cybele Neumann, minha terapeuta holística, e a minha médica Camilla Ricci. Vocês foram tão prestativas e cuidadosas comigo!

A minha orientadora, Emilian Guedes, que é um exemplo de professora com sua calma e jeito leve de ser que tanto me inspira. Obrigada por me deixar fazer parte das suas pesquisas e sempre acreditar no meu potencial. Muito obrigada a todos os meus professores da COEC, toda equipe do laboratório do IFS Campus Aracaju, a Propex e ao Instituto Federal de Sergipe pelo suporte a mim destinado durante minha graduação. Foi uma honra estudar com profissionais de extrema qualidade como vocês.

Por fim, quero dedicar esse TCC a Seu Carlos (in memoriam), que infelizmente foi vítima da Covid-19. Ele sempre foi mais que um motorista para mim, me tratou como uma filha e me acompanhou durante toda a trajetória escolar.

Obrigada pelo carinho, cuidado e dedicação. Para sempre vou lembrar do senhor me perguntando: “Estudou muito hoje, fia?”. Obrigada!

“Tudo, antes de ser fácil, é difícil.”
- Thomas Fuller.

RESUMO

Santos, Mayara de Jesus. **Análise numérica de geogrelhas aplicadas como reforço de base de fundações rasas**. 62 folhas. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe – Campus Aracaju. 2021.

Pensando em melhorar a capacidade de suporte do maciço de forma hábil, surgiu a técnica de solo reforçado com geogrelhas. O estudo do uso das geogrelhas como reforço de base de fundações superficiais, pode ser feito através de análises numéricas, que é uma maneira prática de fazer simulações de como se comportará o maciço reforçado. Dentro desse contexto, o presente trabalho buscou, inicialmente, validar o solo do tipo areia pouco compacta que foi anteriormente ensaiada experimentalmente. Feito isso, foi possível dar confiabilidade aos parâmetros de resistência do solo. O trabalho objetivou analisar numericamente as tensões, a taxa de capacidade de suporte (BCR) e os deslocamentos verticais de uma sapata quadrada isolada de base igual a 1 m. O maciço foi reforçado com as geogrelhas MacGrid W90 da Maccaferri na configuração de uma malha de reforço e duas malhas. As simulações foram realizadas baseadas no Método dos Elementos Finitos, a partir da ferramenta computacional geotécnica Optum G2 da empresa Optum Computational Engineering. Os resultados obtidos mostram que a geogrelha propicia um ganho de 3,60% e 4,10% da capacidade de carga na tensão admissível de serviço (recalque de 25 mm) e na tensão máxima analisada (recalque de 100 mm), respectivamente. As taxas de BCR foram de 1,07 para o solo reforçado com 1 geogrelha e 1,10 para o solo reforçado com a segunda geogrelha.

Palavras-chave: Solo Reforçado. Análise Numérica. Geogrelha. Optum G2. Fundação Rasa.

ABSTRACT

Santos, Mayara de Jesus. **Análise numérica de geogrelhas aplicadas como reforço de base de fundações rasas**. 62 folhas. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe – Campus Aracaju. 2021.

In order to skillfully improve the bearing capacity of the soil, the geogrid-reinforced soil technique was developed. The study of the use of geogrids as reinforcement for shallow foundations can be done through numerical analysis, which is a practical way to simulate how the reinforced mass will behave. Within this context, the present work sought, initially, to validate a poorly compacted sand type soil that was previously tested experimentally. Once this was done, it was possible to have reliability about the soil strength parameters. The work aimed to numerically analyze the stresses, bearing capacity ratio (BCR) and vertical displacements of an isolated square footing with base size equal to 1 m. The massif was reinforced with Maccaferri's MacGrid W90 geogrids in the configuration of one reinforcement layer and two layers. The simulations were performed based on the Finite Element Method, using the Optum G2 geotechnical computational tool from Optum Computational Engineering. The results obtained show that the geogrid provides a gain of 3.60% and 4.10% in load capacity at the allowable service stress and at the maximum analyzed stress of 100 mm, a gain of 7.30% and 12.66%. The BCR rates were 1.07 for the soil reinforced with 1 geogrid and 1.10 for the soil reinforced with the second geogrid.

Keywords: Reinforced Soil. Numerical Analysis. Geogrid. Rasa Foundation. Optum G2.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Torre de Pisa e edifícios de Santos–SP	15
Figura 2: Comportamento do solo não reforçado (natural)	19
Figura 3: Comportamento do solo reforçado	19
Figura 4: Principais tipos de geogrelha: a) extrudada unidirecional; b) extrudada bidirecional; c) soldada; d) tecida	20
Figura 5: Fundação rasa: sapata isolada	23
Figura 6: Mecanismos de ruptura típicos em função do comprimento do reforço: A) reforço com comprimento igual à largura da sapata e B) reforços longos.....	24
Figura 7: Exemplos de aplicação de reforço de fundações rasas com geossintético	25
Figura 8: Sequência de modelos aplicado às vigas	26
Figura 9: Processos para se realizar a análise.....	27
Figura 10: Modelos (a) elástico linear; (b) elástico não linear; (c) não linear e elastoplástico; (d) elástico perfeitamente plástico	29
Figura 11: Deslocamento do solo para um modelo de Mohr-Culomb	34
Figura 12: Interface da sapata isolada no Optum G2	36
Figura 13: Detalhe da Geogrelha MacGrid WG90.....	37
Figura 14: Interface da Geogrelha no Optum G2	37
Figura 15: Módulo de Elasticidade da Geogrelha MacGrid WG9	38
Figura 16: Modelo geométrico com solo natural.....	39
Figura 17: Modelo geométrico com uma e duas geogrelhas.....	40
Figura 18: Configurações da malha em elementos finitos.....	41
Figura 19: Triângulo de 6 nós Gauss	41
Figura 20: Malha de elementos finitos do da modelagem com solo natural	42
Figura 21: Interface e configurações da placa rígida.....	43
Figura 22: Obtenção dos Resultados	44
Figura 23: Definição do BCR.....	45
Figura 24: Validação do solo	46
Figura 25: Curvas de tensão vs. Recalque dos modelos S, SR1G e SR2G.....	47
Figura 26: Taxa BCR do solo reforçado SR1G e SR2G.....	48
Figura 27: Tensões normais verticais dos modelos S, SR1G e SR2G.....	49
Figura 28: Deslocamentos verticais dos modelos S, SR1G e SR2G	50
Figura 29: Esforços normais nas geogrelhas dos modelos SR1G e SR2G.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Configurações dos modelos simulados	35
Tabela 2: Parâmetros de resistência do solo	36
Tabela 3: Propriedades mecânicas da geogrelha	38

LISTA DE SIGLAS

MEF	Método de Elementos Finitos
NBR	Norma Brasileira
IGS	International Geosynthetics Society
GGE	Geogrelha Extrudada
GGB	Geogrelha Soldada
GGW	Geogrelha Tecida
S	Solo Natural
SR1G	Solo Reforçado com 1 Geogrelha
SR2G	Solo Reforçado com 2 Geogrelhas
MC	Mohr-Coulomb
CTC	Compressão Triaxial Convencional
MED	Método dos Elementos Discretos
BCR	Taxa de Capacidade de Suporte

LISTA DE SÍMBOLOS

τ	Tensão de Cisalhamento
c	Coesão
σ	Tensão Normal
u	Profundidade da Primeira Camada de Reforço
h	Espaçamento Entre Reforço
N	Número de Camadas de Reforço
l	Comprimento do Reforço
γ_d	Peso Unitário não Saturado
γ_{sat}	Peso Unitário Saturado
ϕ	Ângulo de Atrito
ν	Coeficiente de Poisson
E	Módulo de Elasticidade
L	Comprimento
B	Largura da Sapata
d	Máxima Profundidade Total do Sistema de Reforço

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	15
2.	OBJETIVOS	17
2.1.	OBJETIVO GERAL	17
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1.	O SOLO REFORÇADO	18
3.2.	GEOSSINTÉTICOS	19
3.2.1.	Geogrelhas	20
3.2.2.	Geogrelhas nas Obras Geotécnicas	22
3.3.	APLICAÇÃO DE GEOGRELHAS NO REFORÇO DE BASE DE FUNDAÇÕES SUPERFICIAIS	22
3.4.	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	25
3.5.	MODELOS CONSTITUTIVOS	28
3.6.	MODELO DE MOHR-COULOMB (MC)	30
3.7.	OPTUM G2 – FE SOFTWARE	31
3.8.	ANÁLISE NUMÉRICA DE SOLOS REFORÇADOS	32
4.	METODOLOGIA	35
4.1.	MOLDAGEM E PROPRIEDADES DOS MATERIAIS SIMULADOS	35
4.1.1.	O Solo	35
4.1.2.	A Sapata Isolada	36
4.1.3.	A Geogrelha	37
4.2.	CONSTRUÇÃO DO MODELO NUMÉRICO	38
4.2.1.	Configurações Geométricas e Condições de Contorno	38
4.2.2.	Configurações da Malha	40
4.2.3.	Aplicação do Carregamento	42
4.3.	OBTENÇÃO DOS RESULTADOS	43
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
5.1.	VALIDAÇÃO NUMÉRICA DO SOLO	46
5.2.	INFLUÊNCIA DO REFORÇO COM GEOGRELHA	46
5.2.1.	Valores da Taxa BCR	48
5.2.2.	Análise das Tensões	49
5.2.3.	Análise dos Deslocamentos Verticais	49
5.2.4.	Análise dos Esforços Normais na Geogrelha	50
6.	CONCLUSÃO	51
	REFERÊNCIAS	53

1. INTRODUÇÃO

Quando é iniciado um projeto para uma construção civil, um aspecto relevante e primordial é verificar as condições geotécnicas do local onde se pretende construir. Nestas investigações realizadas no pré-projeto, algumas vezes observa-se que o solo encontrado não é um maciço favorável à aplicabilidade de fundações rasas, sendo propício a recalques excessivos apresentando baixa capacidade de suporte, tornando assim, restritas as áreas para implementação dessas construções.

Em geral, nas obras de fundações ocorrem recalques, sendo necessário prevê-los e definir um limite a partir do qual se configura um problema geotécnico. Os danos causados por recalques podem ser divididos em três grupos: visuais e estéticos (sem riscos de qualquer natureza); danos que comprometem o uso e a funcionalidade do prédio e danos estruturais, que põe em risco a segurança dos usuários (MILITITSKY, 2005). Patologias como trincas e rachaduras em edificações podem decorrer de recalques, especialmente os recalques diferenciais que se caracterizam por rebaixar mais uma parte da obra do que a outra, provocando esforços não esperados.

Há alguns casos clássicos de patologias decorrentes de recalques, como a Torre de Pisa na Itália e os desaprumos nas edificações no município de Santos, no estado de São Paulo (Figura 1). No entanto, a ocorrência dessas patologias é bastante comum em obras de pequeno e médio porte devido à falta de planejamento, estudos preliminares insuficientes e pouco controle sobre o processo produtivo.

Figura 1: Torre de Pisa e edifícios de Santos–SP



Fonte: Adaptado da Internet (2021)

Nessa circunstância, surgiu a técnica de solo reforçado, que objetiva fornecer ganho de resistência ao solo e diminuir as deformações indesejadas. Obras executadas com solo reforçado apresentam vantagens econômicas, técnicas e construtivas quando comparadas a outros métodos tradicionais. Essa solução geotécnica consiste na introdução de elementos resistentes à tração (como os geossintéticos), compensando, dessa forma, a pouca capacidade que o solo possui quanto a esse esforço.

Esses geossintéticos são materiais não convencionais em que pelo menos um dos componentes é fabricado com polímeros sintéticos ou naturais. É uma tecnologia já consagrada em diversos países e vem ganhando bastante espaço no mercado brasileiro, visto que viabiliza a simplificação de vários problemas e sistemas de engenharia, como por exemplo construções sobre solos frágeis.

Entre os geossintéticos disponíveis no mercado, a geogrelha é muito eficiente quando se trata de reforço para aumentar a carga admissível suportada pelo solo. O estudo do uso das geogrelhas como reforço de base de fundações superficiais, pode ser feito através de análises numéricas, que é uma forma ágil e prática de simular como se comportará o maciço reforçado.

Além disso, nas recentes décadas, os métodos numéricos foram consagrados para fornecer soluções aproximadas para este tipo de problema. Como exemplo tem-se o Método dos Elementos Finitos (MEF) – ferramenta mais utilizada nesta área do estudo. Sendo assim, alguns softwares baseados nesta metodologia foram elaborados para resolver também esses problemas geotécnicos. Alguns deles são: o Plaxis, o Abaqus e o Optum G2.

O emprego de uma ferramenta numérica possibilita uma maior compreensão do comportamento de maciços reforçados, especialmente dos mecanismos de interação desenvolvidos na interface solo-geogrelha, vindo a ser uma ferramenta importante em trabalhos que envolvam estruturas de solo reforçado.

Este trabalho tem como objetivo realizar uma análise numérica dos deslocamentos verticais de uma fundação rasa (do tipo sapata isolada) obtidos em uma modelagem feita a partir da ferramenta computacional geotécnica Optum G2, com e sem a implantação da MacGrid W90 – geogrelha fabricada pela empresa Maccaferri.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Desenvolver no programa computacional Optum G2 um estudo numérico comparativo dos deslocamentos verticais de um maciço de solo no seu estado natural e reforçado com geogrelha, que sustenta uma fundação rasa, do tipo sapata isolada.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Apresentar a relevância da técnica de solo reforçado com geogrelhas;
- Estudar e usar a ferramenta computacional geotécnica Optum G2;
- Validar o solo simulado no programa;
- Desenvolver uma modelagem numérica de uma areia pouco compacta, de uma sapata isolada e da geogrelha da Maccaferri;
- Avaliar a influência da geogrelha referente às tensões e os deslocamentos verticais do solo de fundação.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguinte revisão bibliográfica foi desenvolvida para ser utilizada como base teórica, bem como apresentar uma contextualização para o assunto abordado. Por isso, pesquisou-se trabalhos científicos, normas e manuais técnicos, o que possibilitou a construção do embasamento teórico para relacionar os estudos numéricos do solo reforçado com o uso de geogrelhas sob a base de fundações rasas, do tipo sapata isolada.

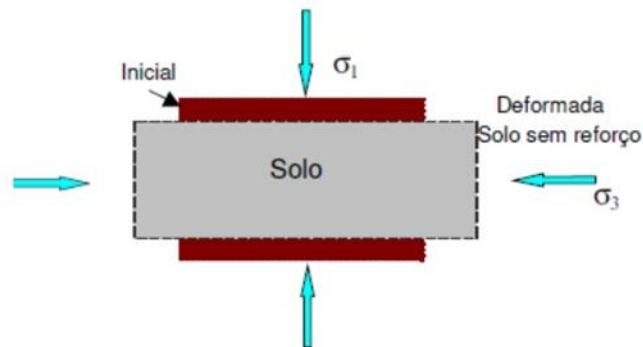
3.1. O SOLO REFORÇADO

Segundo Terzaghi, Peck e Mesri (1996), a melhoria do solo se refere a qualquer processo realizado para aumentar sua resistência, diminuir a permeabilidade ou compressibilidade, ou compensar certas propriedades físicas do solo. Para Cardoso (1987), define-se como técnica de reforço de solos toda aquela em que a introdução de elementos resistentes (reforços), previamente analisados, resulte no aumento da capacidade do solo de resistir aos esforços externos e na diminuição da deformabilidade de um maciço. Dessa forma, as técnicas de reforço de solo consistem no melhoramento do maciço de fundação para que este possa suportar o carregamento advindo da superestrutura.

Ainda conforme Cardoso (1987), a melhoria de solos pode ocorrer de duas maneiras: pela alteração de algumas propriedades específicas do solo (melhoramento), ou pela introdução de elementos resistentes que possibilitem ao maciço suportar determinados esforços (reforço).

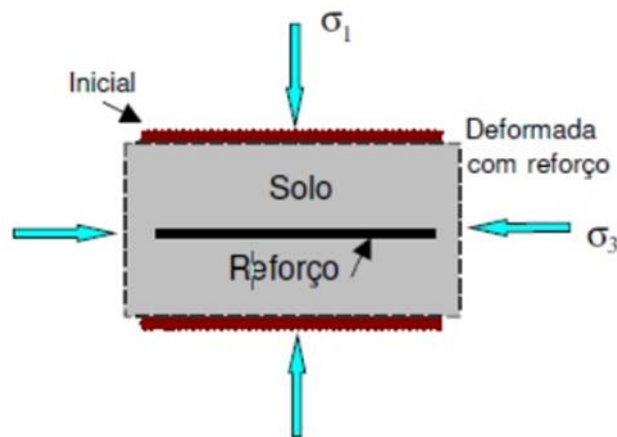
De acordo com Sieira (2003), os solos possuem resistência elevada a esforços de compressão e baixa resistência a esforços de tração. Sendo assim, quando um maciço de solo é carregado verticalmente, ele sofre deformações verticais de compressão e expansão lateral. Entretanto, quando o solo é reforçado, essas deformações laterais são restringidas pelos esforços de tração desencadeados do material de reforço utilizado. As Figuras 2 e 3, na página seguinte, mostram o comportamento, geral, dos solos com e sem reforço.

Figura 2: Comportamento do solo não reforçado (natural)



Fonte: Abramento (1998)

Figura 3: Comportamento do solo reforçado



Fonte: Abramento (1998)

3.2. GEOSSINTÉTICOS

A NBR ISO 103181:2018 (Geossintéticos – Parte 1: Termos e definições) descreve geossintético como: “[...] produto em que ao menos um de seus componentes é produzido a partir de um polímero sintético ou natural, sob a forma de manta, tira ou estrutura tridimensional, utilizado em contato com o solo ou outros materiais, em aplicações da engenharia geotécnica e civil”. Os geossintéticos podem desempenhar uma ou mais funções, sendo as principais: proteção, separação de camadas de solo com distribuições de partículas diferentes, drenagem, filtração, impermeabilização, controle de erosão superficial e reforço do solo.

Esses materiais são considerados uma alternativa de rápida aplicação, fácil uso, e vêm se tornando uma solução de engenharia econômica e ambientalmente favorável quando comparada com as demais (PALMEIRA 2010). Os mais conhecidos são os geotêxteis, geogrelhas, geocélulas, geomantas, geodrenos,

geoespaçadores, geoexpandidos, geotiras, geofibras, geomembranas e geocompostos.

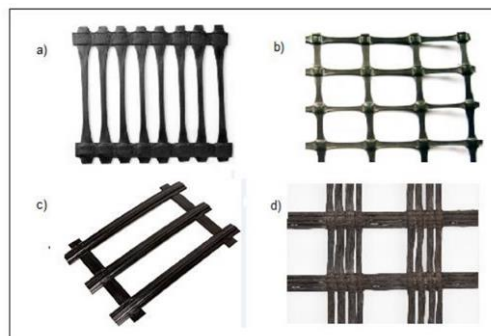
3.2.1. Geogrelhas

Segundo Vertematti (2004), a geogrelha é o geossintético que apresenta em sua estrutura a forma de grelha e possui como função predominante o reforço do solo. Elas são um recurso de melhoria do solo bastante utilizado na engenharia geotécnica e que já apresentam resultados significativos nos estudos de caso que a utilizaram.

A NBR ISO 10318-1:2018 define geogrelha como uma estrutura polimérica plana, constituída por uma malha aberta e regular de elementos de tração completamente conectados, que podem ser unidos por extrusão, solda, “interlooping” ou entrelaçamento, e cujas aberturas são maiores que os elementos constituintes. Elas apresentam uma importante capacidade de interação com o meio no qual estão confinadas e são elaboradas para serem resistentes à tração. Antunes (2008) afirma que as geogrelhas são materiais planares flexíveis formados por uma rede regular de elementos, com aberturas de tamanho suficiente para interagir com o material circundante.

As geogrelhas podem ser classificadas como unidirecionais, quando apresentam notável resistência à tração apenas em uma direção, ou como bidirecionais, quando apresentam elevada resistência à tração nas duas direções principais (ortogonais). Quanto ao processo de fabricação, as geogrelhas podem ser tecidas, extrudadas e soldadas. A Figura 4, a seguir, apresenta os principais tipos de geogrelha.

Figura 4: Principais tipos de geogrelha: a) extrudada unidirecional; b) extrudada bidirecional; c) soldada; d) tecida



Fonte: Medeiros (2008)

As denominações apresentadas na Figura 4 são caracterizadas da seguinte forma:

Geogrelha extrudada [GGE]: obtida através de processo de extrusão e sucessivo estiramento, que pode ser em único sentido, formando geogrelhas unidirecionais, ou nos dois sentidos, formando geogrelhas bidirecionais, sendo geralmente fabricadas em polietileno ou polipropileno;

Geogrelha soldada [GGB]: composta por elementos de tração longitudinais e transversais, produzidos geralmente a partir de feixes de filamentos têxteis sintéticos, recobertos por um revestimento protetor, e soldados nas juntas. Tem-se também, atualmente, geogrelhas soldadas com raios laser, com elementos extrudados;

Geogrelha tecida [GGW]: composta por elementos de tração longitudinais e transversais produzidos geralmente a partir de feixes de filamentos têxteis sintéticos, tricotados ou intertecidos nas juntas e recobertos por um revestimento.

Como as geogrelhas estão disponíveis em diferentes formas e composições, a sua escolha depende prioritariamente dos critérios adotados no projeto, pois essa escolha influencia diretamente na eficiência e nos fatores de melhora atribuídos ao geossintético em questão. Segundo Medeiros (2008), quando a geogrelha é agregada a um maciço de solo, espera-se que eae satisfaça aos seguintes parâmetros:

- Elevada resistência à tração;
- Elevado módulo de deformabilidade;
- Baixa suscetibilidade à fluência;
- Durabilidade compatível com a vida útil da obra;
- Elevado grau de interação com o solo envolvente.

Antunes (2008) destaca que esse tipo de geossintético é utilizado comumente em sistemas de pavimentos rodoviários em três situações: (a) para servir como ajuda em construções de pavimentos sobre solos moles; (b) melhoria ou aumento da vida útil de projeto do pavimento; (c) redução de deformações permanentes para uma determinada vida útil. Além disso, pesquisas realizadas por Al-Qadi *et al.* (1997), Cancelli *et al.* (1996) e Hass *et al.* (1988), mostram que a espessura de base

em sistemas de pavimentos rodoviários pode ser reduzida quando a geogrelha é incluída no projeto.

3.2.2. Geogrelhas nas Obras Geotécnicas

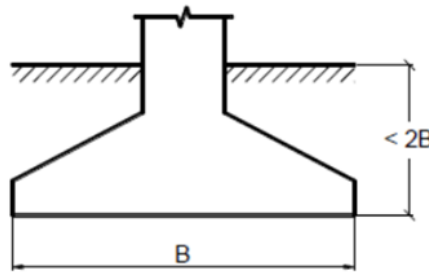
De acordo com a Macaferri (2009), atualmente quase todas as obras em terraplanagem necessitam de algum tipo de reforço ou elemento estabilizante para que possam ser construídas. Não importa qual o tipo de obra geotécnica, uma vez que envolva problemas de ruptura por cisalhamento dos solos, os reforços geossintéticos podem ser benéficos. Especificamente as geogrelhas são um tipo de reforço muito utilizado devido a sua elevada resistência e baixo alongamento.

Dessa maneira, as geogrelhas são um tipo de geossintético muito importante e útil para engenharia geotécnica como um todo, em especial quando se trata de reforço de solo para aumentar a carga admissível suportada pelo maciço. Bilfinger e Mello (2015) destacam que a função do reforço com geossintético é basicamente a de usar sua capacidade de resistência à tração, para restringir deformações em estruturas geotécnicas.

3.3. APLICAÇÃO DE GEOGRELHAS NO REFORÇO DE BASE DE FUNDAÇÕES SUPERFICIAIS

É através das fundações que as construções da engenharia civil transferem suas cargas para o solo em que estão apoiadas e, por sua vez, tais fundações podem ser classificadas como superficiais ou profundas. De acordo com a NBR 6122/2010 (Projeto e execução de fundações), a fundação superficial ou rasa consiste no elemento de fundação em que a carga é transmitida ao terreno por meio das tensões distribuídas sob a base da mesma e que a profundidade de assentamento em relação ao terreno adjacente é inferior a duas vezes a menor dimensão, como mostra a Figura 5.

Figura 5: Fundação rasa: sapata isolada



Fonte: Bastos (2012)

As fundações superficiais mais comuns são os blocos, radier e as sapatas. Esta última, pode ter diferentes formatos, como: circular, retangular, quadrada, corrida ou irregular.

Segundo Veloso e Lopes (2010), alguns dos fatores mais importantes a serem considerados em um projeto de fundações que podem comprometer o desempenho de uma obra, são: o tipo de solo em que serão executadas, as cargas aplicadas sobre o solo e sua resposta a estas solicitações de cargas. Bilfinger e Mello (2015) afirmam que quando o solo apresenta baixa capacidade de carga ele deve ser substituído total ou parcialmente e/ou reforçado, para que possa recepcionar fundações diretas.

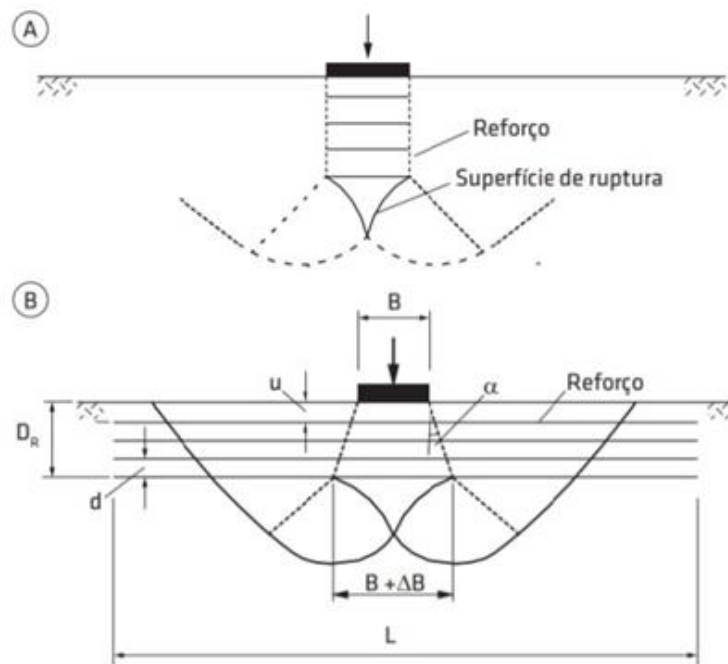
A escolha do tipo da técnica ideal para aplicar reforço de base em fundações rasas relaciona-se diretamente com o tipo de solo, nível de tensão e do custo-benefício da técnica. Atualmente, já existem algumas tecnologias no mercado. Algumas são consideradas simples, como por exemplo, a compactação do solo, enquanto outras são mais elaboradas, como: misturas com ligante (solo-cimento), correlação granulométrica, uso de micro estacas, congelamento do terreno e inserção de reforços geossintéticos.

Dessa maneira, a alternativa de reforço com o geossintético do tipo geogrelha vem sendo uma saída para aumentar o potencial de suporte do maciço de solo, e assim, diminuir gastos com a fundação. O uso de geossintético como reforço de base permite utilizar fundações rasas em solos nos quais normalmente esse tipo de fundação não seria viável, evitando assim o uso de fundações profundas, as quais costumam ser mais onerosas e complexas.

A fim de avaliar os parâmetros geométricos de uma sapata sobre solo reforçado com geossintético, Omar *et al.* (1993), realizaram análises com modelos

reduzidos de sapatas apoiadas em areia pura. Eles obtiveram resultados positivos uma vez que o solo apresentou uma capacidade de carga quatro vezes maior quando reforçado. Conforme Palmeira (2018), existem dois tipos de mecanismos de ruptura de fundações rasas apoiadas sobre solos reforçados que dependem, especialmente, dos comprimentos das camadas de reforço, como mostrado na Figura 6, localizada na página seguinte.

Figura 6: Mecanismos de ruptura típicos em função do comprimento do reforço: A) reforço com comprimento igual à largura da sapata e B) reforços longos



Fonte: Palmeira (2018)

Na Figura 6(A), o mecanismo presente é denominado mecanismo de sapata profunda, que prevalece quando uma zona quase rígida é desenvolvida sob a sapata, como se a base da sapata fosse transferida para a profundidade da base da massa reforçada no caso de camadas de reforço com comprimento igual à largura da sapata.

O segundo mecanismo, Figura 6(B), é denominado mecanismo de placa larga, que prevalece quando a placa de solo quase rígida (formada pela zona reforçada) se estende além da largura da sapata. O autor mostra que além do material escolhido para realizar o reforço, a configuração dele também influencia na capacidade de suporte que o maciço terá, bem como, influi no estado limite de ruptura do solo.

Bilfinger e Mello (2015), salientam a importância do desenvolvimento de estudos a respeito da utilização de fundações reforçadas com geossintéticos, uma vez que as metodologias de cálculo atuais se apresentam como conservadoras e pouco realistas. A Figura 7, próxima página, exemplifica casos de obras de fundações rasas em que a base foi reforçada com geossintéticos.

Figura 7: Exemplos de aplicação de reforço de fundações rasas com geossintético



Fonte: Huesker (2016)

3.4. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Com o avanço da tecnologia e crescente uso dos computadores, a engenharia, como um todo, também se apropriou do ambiente virtual para obter respostas e resultados conforme a crescente agilidade demandada. Dessa maneira, análises numéricas, por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF), passaram a ganhar espaço e ser consolidadas, pois, conforme Soriano (2003), embora se trate de aproximações, a solução de um modelo matemático ainda é tida como exata.

De acordo com Alves (2007), o Método dos Elementos Finitos permite a realização da simulação de situações reais num espaço discreto, no qual o limite infinitesimal tende ao contínuo. Dessa forma, é possível, então, estudos relativos à

ciência e a engenharia de forma a reproduzir ambientes de grande extensão e de diversos níveis de complexidade.

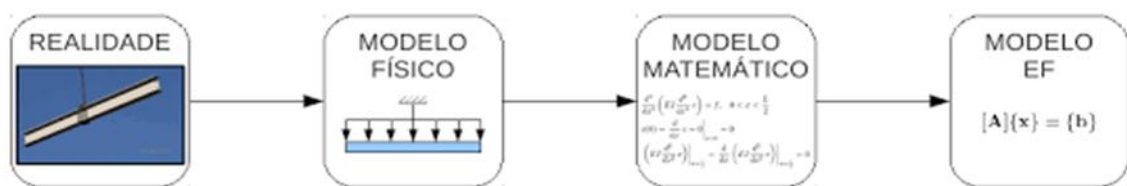
A característica principal do MEF, ainda segundo o autor, consiste em:

“utilizar aproximações locais nos subdomínios, nos quais o domínio original foi dividido, em vez de utilizar aproximações de caráter global. Para a obtenção de respostas cada vez melhores, aumenta-se o número de subdomínios, mantendo-se o comportamento local já adotado em cada subdomínio, no lugar de se adotar funções de ordem maior na aproximação de caráter global. Os subdomínios são denominados elementos finitos.”

Se tratando da engenharia geotécnica, o método é muito utilizado para validar pesquisas empíricas e para realizar análises de estabilidade de talude, aterro sobre solos moles, uso de geossintéticos, projetos de estruturas de fundação, entre outros. Potts e Zdravkovic (1999) apresentam o método de elementos finitos para a análise de muitos problemas relacionados à geotecnia.

Os softwares de engenharia geotécnica, atualmente, têm uma interface gráfica interativa e de fácil manuseio, tornando-se uma ferramenta indispensável e bastante utilizada. O recurso é empregado, normalmente, para simular um problema físico de uma estrutura, ou parte dela, submetida à ação de cargas. Para obter o modelo matemático são aplicadas algumas suposições e/ou aproximações do problema, que juntas geram equações diferenciais que governam o modelo dos elementos finitos. A Figura 8, traz um exemplo aplicado às vigas de uma estrutura.

Figura 8: Sequência de modelos aplicado às vigas

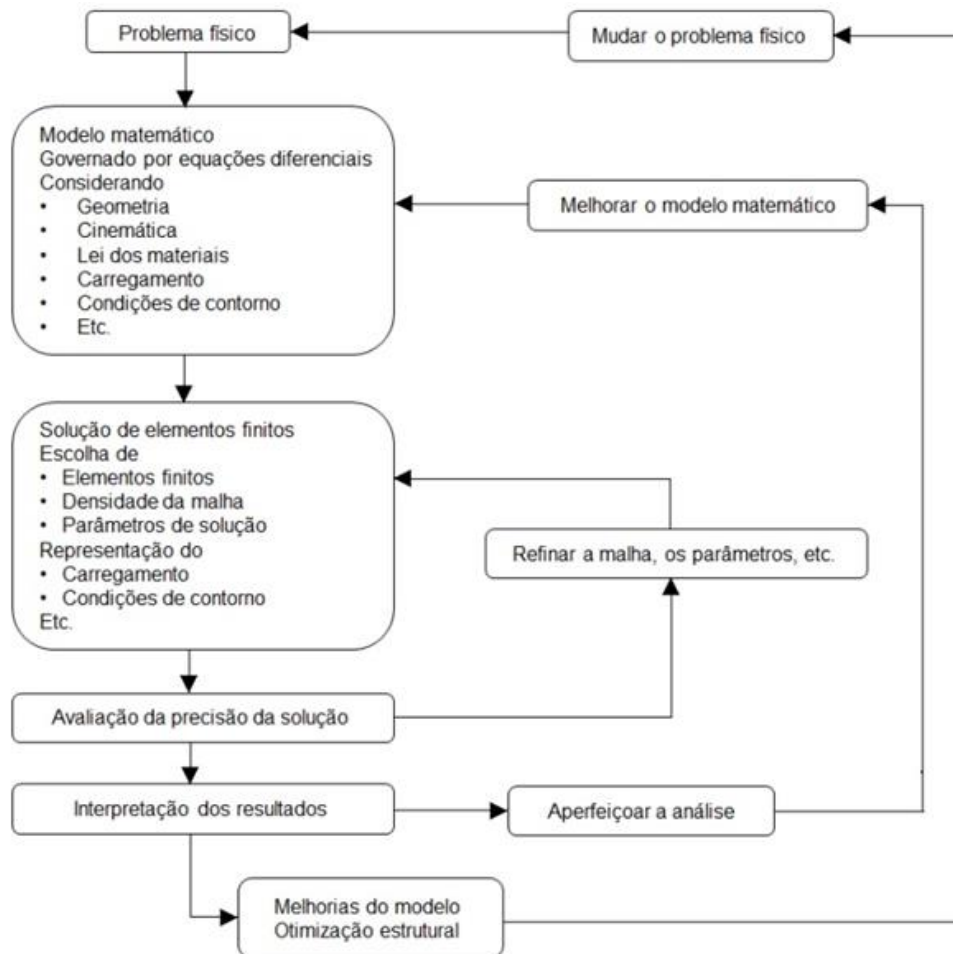


Fonte: Adaptado da Internet (2021)

Outro ponto relevante é que, assim como afirmado por Pires (2018), o Método dos Elementos Finitos pode ser uma maneira de proporcionar modelagens realísticas confiáveis que possuem custos menores que os modelos físicos e aplicações práticas para a engenharia. Dessa forma, pode-se avaliar possíveis soluções para os problemas da engenharia sem gastar muitos recursos com testes.

No entanto, as soluções com os elementos finitos precisam ser bem interpretadas e analisadas para serem validadas como próxima do real. Em concordância com Bathe (1982), não se pode prever a resposta de forma exata, tendo em vista que existem muitas interações presentes. A Figura 9, na página seguinte, mostra um fluxograma com as etapas para se realizar uma análise em elementos finitos.

Figura 9: Processos para se realizar a análise



Fonte: Adaptado de Bathe (1982)

As suposições inseridas no problema físico (Figura 9) são realizadas no pré-processamento. Elas consistem em:

- Discretização do meio contínuo: consiste na subdivisão do meio em elementos interconectados (elementos finitos);
- Montagem dos elementos: os elementos são ligados por meio das interfaces, através das linhas, superfícies e nós;
- Formulação das propriedades do elemento: cada elemento tem uma função que descreve de forma aproximada o seu deslocamento;
- Determinação dos modelos constitutivos e da relação deslocamento x deformação dos elementos;
- Imposição das condições de contorno do problema.

3.5. MODELOS CONSTITUTIVOS

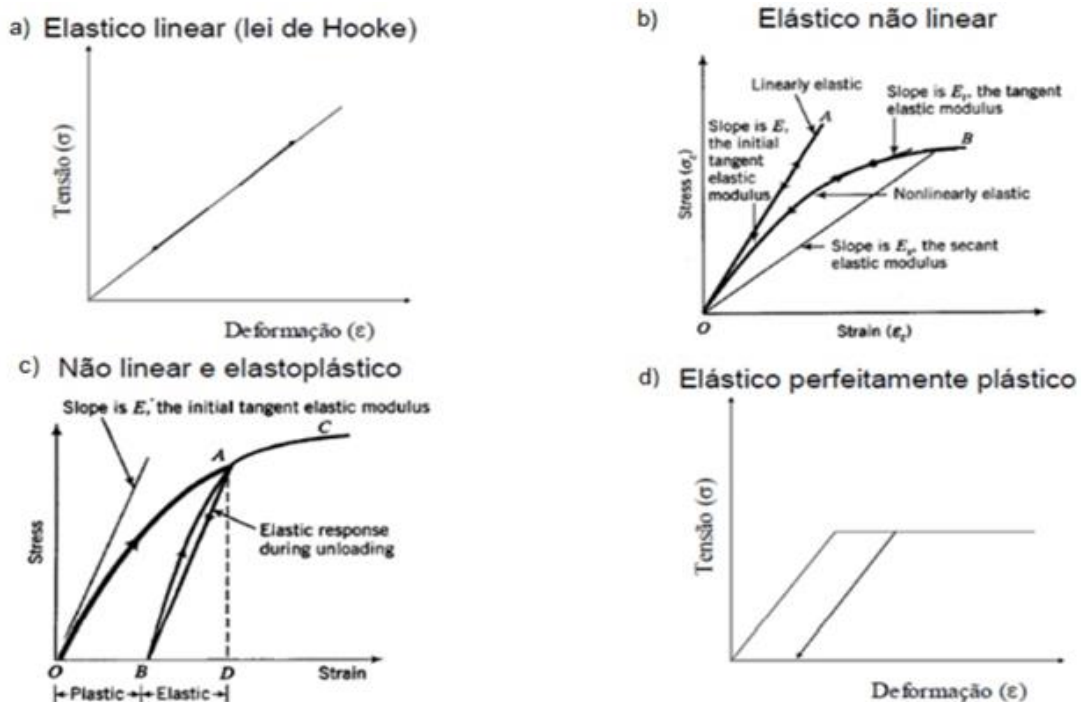
A complexidade presente nas discussões sobre a deformação de solos é um dos campos da engenharia geotécnica no qual são analisadas as suas formas de desempenho e resistência. Nesse contexto, a depender da história de carregamento e tensões atuantes no solo, deformações elásticas (reversíveis) e plásticas (irreversíveis) podem ocorrer simultaneamente, como argumento para a aplicação dos modelos elastoplásticos em equações constitutivas.

De acordo com Guimarães (2008), a principal vantagem trazida ao estabelecer um modelo matemático é a possibilidade de aplicar idealizações capazes de resolver eventos quantitativamente. Assim, pode-se afirmar que o principal intuito de uma lei ou modelo constitutivo é representar matematicamente, por meio de gráficos e formulações, o comportamento de um material.

Os modelos constitutivos retratam as propriedades dos materiais que estão associadas à resistência e rigidez. Segundo Nader (1993), por meio de ensaios experimentais e triaxiais, deformações elásticas e plásticas podem ser observadas nos solos o que justifica o uso de modelos elastoplásticos em equações constitutivas.

Ainda de acordo com Nader (1999), o modelo constitutivo elastoplástico surgiu como uma representação de forma mais consistente sobre os processos de escoamento e os estados de descarregamento e recarregamento, suprimindo a deficiência dos modelos elástico, hiperelástico e hipoelástico. Em resumo e de forma esclarecedora, a Figura 10, na página seguinte, apresenta alguns modelos simplificadores:

Figura 10: Modelos (a) elástico linear; (b) elástico não linear; (c) não linear e elastoplástico; (d) elástico perfeitamente plástico



Fonte: Adaptado Gerskovich (2017)

Na Figura 10(a), o diagrama tensão-deformação demonstra o comportamento elástico linear de um material, caracterizado pela relação na qual as deformações e as tensões são proporcionais e atendem a lei de Hooke. De modo geral, os materiais possuem este tipo de comportamento quando são submetidos a pequenas deformações, enquanto que em grandes deformações o material não apresentará condição de linearidade.

Na Figura 10(b), o gráfico também ilustra um comportamento elástico, mas as tensões não são linearmente proporcionais às deformações. Assim, seu comportamento elástico não linear apresenta uma relação tensão-deformação elástica mais geral e não restrita à hipótese de linearidade. Nesse comportamento, a deformação elástica é independente do tempo e permanece constante durante o período em que a carga é mantida constante. Além disso, também é comum que, após a remoção da carga, a deformação seja recuperada e a deformação retorne imediatamente para o valor zero.

Já no caso ilustrado na Figura 10(c), o material apresenta um comportamento não linear e elastoplástico. Quando o material é carregado acima de uma

determinada tensão começa a se deformar plasticamente. Após o descarregamento, o material não retorna ao seu estado original, apresentando deformações permanentes ou residuais. O ponto no qual as deformações começam a se tornar significativas é chamado de limite de escoamento. Sendo assim, o material que apresenta deformações plásticas após o processo de carregamento/descarregamento é denominado elastoplástico.

Na Figura 10(d), o comportamento ilustrado é utilizado como uma aproximação teórica simplificada para simular os materiais que apresentam comportamento elastoplástico. Até certo limite de solicitação, denominado limite de escoamento, o material pode apresentar um comportamento elástico linear e, acima deste limite, o comportamento é elastoplástico. O diagrama tensão-deformação desses materiais é formado por duas retas, supõe-se que o material obedeça a lei de Hooke até o ponto de escoamento, depois do qual escoar com tensão constante.

3.6. MODELO DE MOHR-COULOMB (MC)

Um dos modelos constitutivos elastoplásticos mais estudados e utilizados na realização de análises, é o modelo elástico perfeitamente plástico com função de Mohr-Coulomb (MC), definido em sua resistência ao cisalhamento (τ) na iminência da ruptura, no plano de ruptura, pela Equação 1, a seguir.

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (1)$$

Onde, c é a coesão e φ o ângulo de atrito interno do material.

Seus parâmetros podem ser determinados a partir de ensaios de compressão triaxial convencional (CTC), desde que leve o material até a condição de ruptura. De acordo com Ferreira (2014), embora não reproduza o comportamento não linear dos solos, o modelo Mohr-Coulomb permite um cálculo rápido e simples das condições do solo.

O modelo MC é um modelo elástico perfeitamente plástico, em que o solo tem um comportamento elástico linear até o carregamento atingir a cedência. A partir deste ponto, o solo tem um comportamento perfeitamente plástico. Nesta fase, a rigidez é nula com a geração de deformações plásticas mesmo sem incrementos de tensão. As deformações sofridas pelo solo são, assim, decompostas em duas componentes distintas: as deformações elásticas e as deformações plásticas.

É importante destacar que tanto para o comportamento elástico perfeitamente-plástico quanto para o comportamento elastoplástico não linear, as deformações permanentes ocorrem quando o material ultrapassa o regime elástico e entra no regime plástico. Além disso, as deformações elásticas são as únicas presentes em baixas tensões e, caso o material experimente tensões maiores, ele apresentará deformações elásticas e plásticas, caracterizando assim o comportamento elastoplástico.

Vale destacar ainda que para o comportamento elástico perfeitamente-plástico as deformações permanentes ocorrem sem o acréscimo de tensões, enquanto no caso do comportamento elastoplástico acontecem com o aumento de tensão.

3.7.OPTUM G2 – FE SOFTWARE

O software Optum G2, da empresa Optum Computational Engineering (Optum CE), é um programa de computação baseado no Método dos Elementos Finitos. Ele tem o objetivo de possibilitar pesquisas e investigações referentes à resistência e deformação dos solos e está voltado para a resolução de problemas geotécnicos.

Conforme os autores Sall *et al.* (2019), o Optum G2 contém uma gama de elementos, incluindo os populares triângulos de 6 nós e 15 nós. Seu núcleo computacional se baseia no estado da arte de algoritmos que levam a uma eficiência sem precedentes e robustez independente da complexidade do modelo constitutivo, número de elementos na malha, etc. O programa possui uma interface didática acessível e trabalha com variados tipos de análises, os quais foram listados por Oliveira (2018), abaixo:

- Análise Limite (Limit Analysis): Utilizada para determinação da capacidade de carga do solo, considerando comportamento elastoplástico do solo, dispensando a necessidade da condução de análises elastoplásticas por estágio de carregamento;
- Análise de Tensões Iniciais (Initial Stresses): Determina as condições de tensões iniciais do solo, para um modelo de geometria e carregamento permanentes representativos da condição natural do solo, ou seja, sem aplicação de cargas externas;

- **Análise Elástica (Elastic):** Considera o solo com comportamento elástico, onde as condições de plastificação do material são desconsideradas;
- **Análise de Redução de Resistência (Strength Reduction):** Determina um fator de redução de resistência, necessário para deixar o sistema em situação de colapso incipiente;
- **Análise Elastoplástica (Elastoplastic):** Análise de natureza similar à análise elástica, considerando, no entanto, os critérios de ruptura definidos para os materiais, levando em conta a sua capacidade de plastificação. É o tipo de análise mais apropriado para análises de deformações devido ao acréscimo de carregamento externo e para casos de vários estágios de carregamento;
- **Análise Elastoplástica com Multiplicador (Multiplier Elastoplastic):** É uma combinação da análise limite com a análise elastoplástica, onde os carregamentos são sequenciados de maneira automática e as deformações são calculadas de maneira elastoplástica a cada estágio de carregamento;
- **Análise de Consolidação (Consolidation):** Aplicável onde a geração e dissipação de poropressões com o tempo são relevantes, sendo, portanto, utilizada para o caso de análises de recalques de adensamento.

Assim, o software disponibiliza uma quantidade significativa de materiais padrão com parâmetros que representam geomateriais comuns e elementos estruturais da geotecnia. Já com relação à escolha entre vários dos critérios de ruptura abordados pela literatura, o software possibilita análises considerando critérios como o de Mohr-Coulomb, Drucker-Prager, Hoek-Brown, Mohr-Coulomb modificado, Bolton, dentre outros.

3.8. ANÁLISE NUMÉRICA DE SOLOS REFORÇADOS

Há três formas principais de estudar os problemas da engenharia: métodos analíticos, métodos experimentais e métodos numéricos. Os estudos numéricos possibilitam diversas simulações de arranjos e o uso de materiais diferenciados,

vindo a ser um método bastante importante em trabalhos que envolvam estruturas de solo reforçado. O método de elementos finitos, por sua vez, é uma ferramenta numérica frequentemente empregada em pesquisas de fundações em solos reforçados.

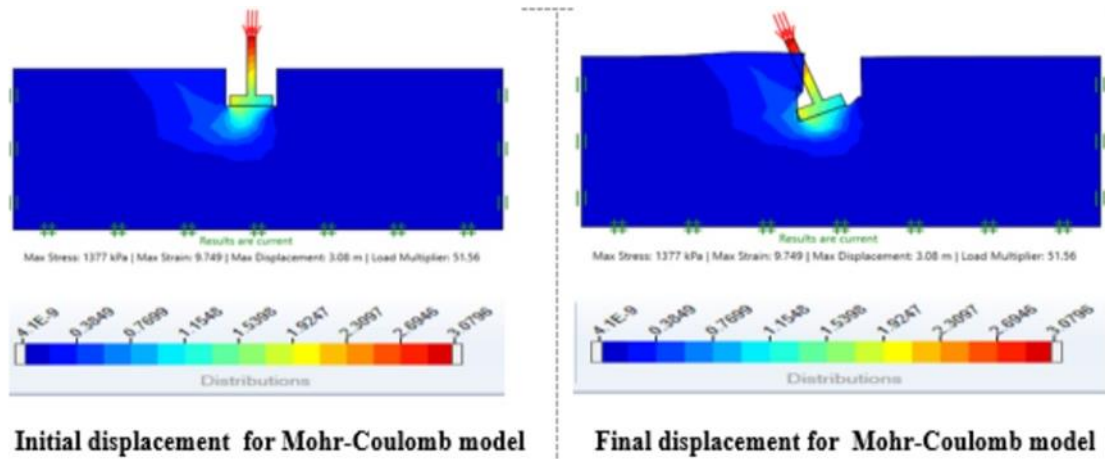
Kurian *et al.* (1997) realizaram estudos numéricos sobre fundações rasas em areia reforçada com o objetivo de avaliar as deformações do conjunto solo-reforço com foco na interação entre o solo e o elemento de reforço. Chakraborty e Kumar (2014) simularam em MEF o comportamento de uma sapata corrida apoiada em solo reforçado, simulando tanto solos coesivos como não coesivos.

Maharaj (2003) investigou através de análises bidimensionais em elementos finitos, a influência de diferentes configurações de reforços nos deslocamentos verticais de sapatas corridas sobre solos argilosos. Os parâmetros investigados incluem: a profundidade da primeira camada de reforço (u), o espaçamento entre camadas de reforço (h), o número de camadas de reforço (N) e o comprimento do reforço (l). Os resultados indicam redução nos deslocamentos verticais com o aumento do comprimento do elemento de reforço tanto para uma camada como para múltiplas camadas de reforço.

Tran *et al.* (2015) fizeram uma análise numérica simulando uma sapata apoiada em solo arenoso reforçado por geogrelha, sendo a areia simulada em MED (método dos elementos discretos). Já Zhongzhi, Shengshui e Sihong (2016) simularam uma placa de carregamento apoiada em material granular utilizando o MED em 2D. Ouria e Mahmoudi (2018) realizaram um estudo em laboratório e análise numérica utilizando método dos elementos finitos para analisar o comportamento de uma sapata corrida apoiada em solo arenoso reforçado com geotêxtil e o efeito do tratamento em cimento da interface entre o geotêxtil e a areia.

Ademais, tem-se o estudo numérico desenvolvido por Sall *et al.* (2019), que propôs analisar a interação solo-estrutura aplicada a fundações rasas. O estudo dos elementos finitos é realizado utilizando o software Optum G2 que permite levar em consideração os diversos comportamentos da massa do solo. O modelo de Mohr-Coulomb descreveu o comportamento do solo. A Figura 11, página seguinte, mostra o deslocamento vertical para um modelo de Mohr-Coulomb apresentado pelo autor.

Figura 11: Deslocamento do solo para um modelo de Mohr-Culomb



Fonte: Sall *et al.* (2019)

A investigação continua com um estudo paramétrico da massa do solo variando o módulo de elasticidade, o ângulo de atrito interno, a coesão, o coeficiente de Poisson e os critérios de falha para estudar suas influências sobre o comportamento mecânico da fundação.

4. METODOLOGIA

Neste trabalho foram desenvolvidos estudos numéricos através do software Optum G2. Essa ferramenta computacional permite, de forma simplificada, realizar modelagens de interface gráfica, inserir os elementos geotécnicos e aplicar cargas para as devidas análises propostas.

Sendo assim, no presente estudo, foram verificados os deslocamentos verticais de uma fundação em sapata isolada apoiada sobre um solo pouco resistente com o auxílio de geogrelhas como reforço de base. Para isso, foram simulados 3 (três) modelos com as configurações apresentadas na Tabela 1 de acordo com a quantidade de geogrelhas utilizadas como reforço.

Tabela 1: Configurações dos modelos simulados

Modelo	Código do Modelo	Dados
1	S	Solo Natural
2	SR1G	Solo Reforçado com 1 geogrelha
3	SR2G	Solo Reforçado com 2 geogrelhas

Fonte: A autora (2021)

A seguir são discriminadas as propriedades dos materiais modelados, a interface e o tipo de análise simulada no programa, além das cargas empregadas para observação do comportamento dos deslocamentos verticais na sapata isolada.

4.1. MOLDAGEM E PROPRIEDADES DOS MATERIAIS SIMULADOS

4.1.1. O Solo

O solo modelado no Optum G2 teve o propósito de ser similar ao maciço de solo utilizado nos experimentos de Lima (2019), que desenvolveu ensaios de prova de carga estática no Instituto Federal de Sergipe, campus Aracaju.

Foram realizadas retroanálises simulando as mesmas condições geométricas do ensaio de Lima (2019), para que se pudesse obter os parâmetros de resistência do solo que alimentam o modelo, tais como: peso unitário não saturado (γ_d), peso unitário saturado (γ_{sat}), coesão (c), ângulo de atrito (ϕ), coeficiente de Poisson (ν) e módulo de elasticidade (E).

O maciço de solo foi considerado um material elastoplástico que segue o critério de falha de Mohr-Coulomb, afinal é um critério considerado bastante completo e eficiente quando aplicado aos solos. Ele foi classificado como areia pouco compacta, e apresenta as seguintes características obtidas no resultado da validação numérica do solo, Tabela 2 abaixo.

Tabela 2: Parâmetros de resistência do solo

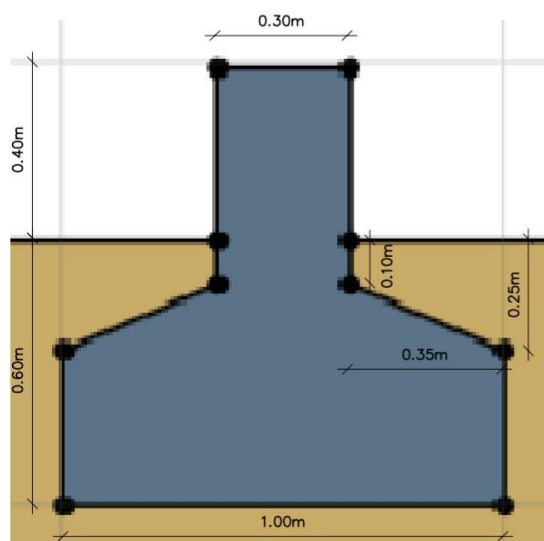
Propriedades do solo		
Parâmetro	Valor	Unidade
Módulo de Elasticidade (E)	10	MPa
Coefficiente de Poisson (ν)	0,35	Adimensional
Coesão (c)	0	kPa
Ângulo de Atrito (ϕ)	30,50	Graus
Peso Unitário não saturado (γ_d)	18	kN/m ³
Peso unitário saturado (γ_{sat})	20	kN/m ³

Fonte: A autora (2021)

4.1.2. A Sapata Isolada

A sapata isolada simulada foi de base quadrada de 1m, altura de embutimento de 60cm e constituída de concreto armado. Ela foi modelada como material rígido com peso unitário de 25 kN/m³. A Figura 12 mostra a configuração geométrica da sapata moldada.

Figura 12: Interface da sapata isolada no Optum G2



Fonte: A autora (2021)

4.1.3. A Geogrelha

Foi modelada uma geogrelha comercial do tipo MacGrid WG90 (Figura 13), fabricada pela empresa Maccaferri, especialista na fabricação de geossintéticos, que são quimicamente duráveis e resistentes à degradação biológica. Essa geogrelha é composta por fios de poliéster de alta tenacidade e alto peso molecular, e normalmente é utilizada para reforço de solo.

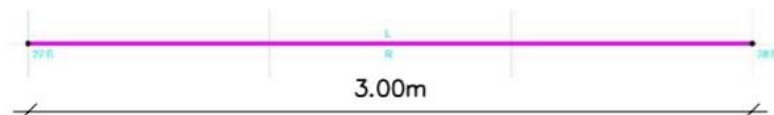
Figura 13: Detalhe da Geogrelha MacGrid WG90



Fonte: Lima (2019)

A tela da geogrelha foi representada no software como um “GeoGrid”, representado por um elemento linear com 3m de comprimento (L). As condições de contorno do material são: deslocamentos verticais, horizontais e de rotação ficam livres (Figura 14). As propriedades da MacGrid WG90 estão na Tabela 3.

Figura 14: Interface da Geogrelha no Optum G2



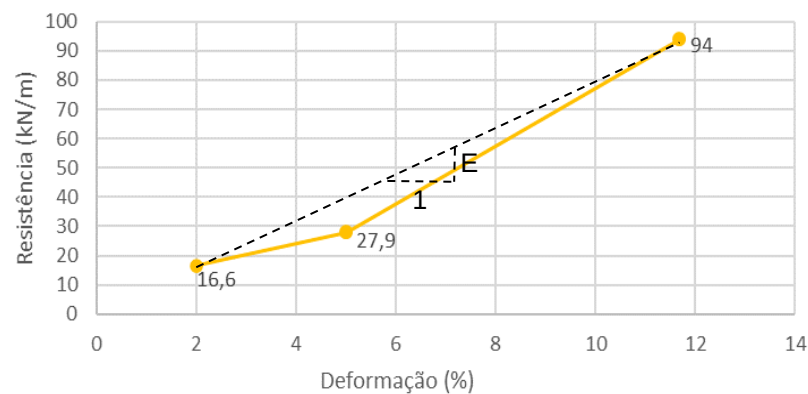
Fonte: A autora (2021)

Tabela 3: Propriedades mecânicas da geogrelha

MacGrid WG90		
Propriedades Mecânicas	Valor	Unidade
Resistência Longitudinal à tração	94	KN/m
Resistência a 2% de deformação	16,6	KN/m
Resistência a 5% de deformação	27,9	KN/m

Fonte: A autora (2021)

De posse das informações da Tabela 3 acima, foi possível construir um gráfico (Figura 15) com os valores de deformação e resistência da geogrelha MacGrid WG90.

Figura 15: Modulo de Elasticidade da Geogrelha MacGrid WG9

Fonte: A autora (2021)

A partir dele, o módulo de elasticidade da geogrelha foi obtido realizando-se o cálculo da tangente do triângulo formado pelos pontos extremos das retas do gráfico. Dessa forma, o módulo encontrado é de aproximadamente 798 kN/m.

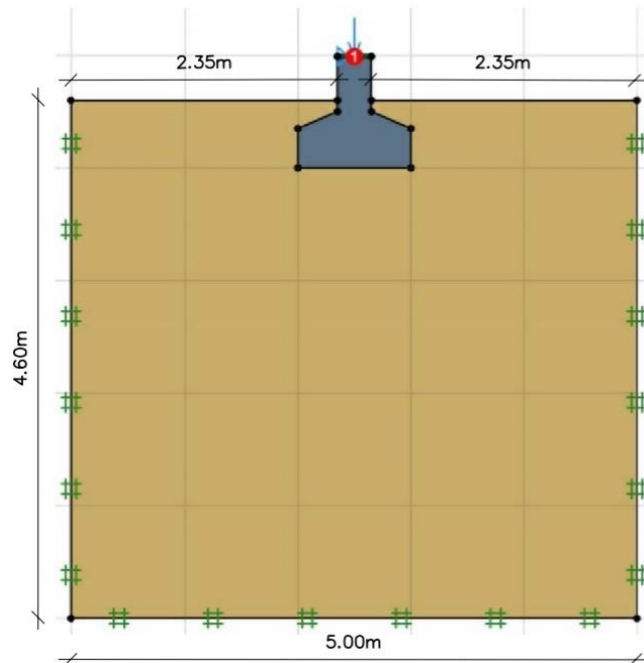
4.2. CONSTRUÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

4.2.1. Configurações Geométricas e Condições de Contorno

Inicialmente, foi definido um espaço amostral para simulação de 4,60 m de altura e 5,0 m de comprimento. Nas condições de contorno, os deslocamentos normais são restringidos nas laterais e os deslocamentos normais e tangenciais são restringidos na base, como observado na Figura 16.

No primeiro modelo (Figura 16), foi simulada a sapata isolada de base quadrada apoiada sobre o solo natural.

Figura 16: Modelo geométrico com solo natural



Fonte: A autora (2021)

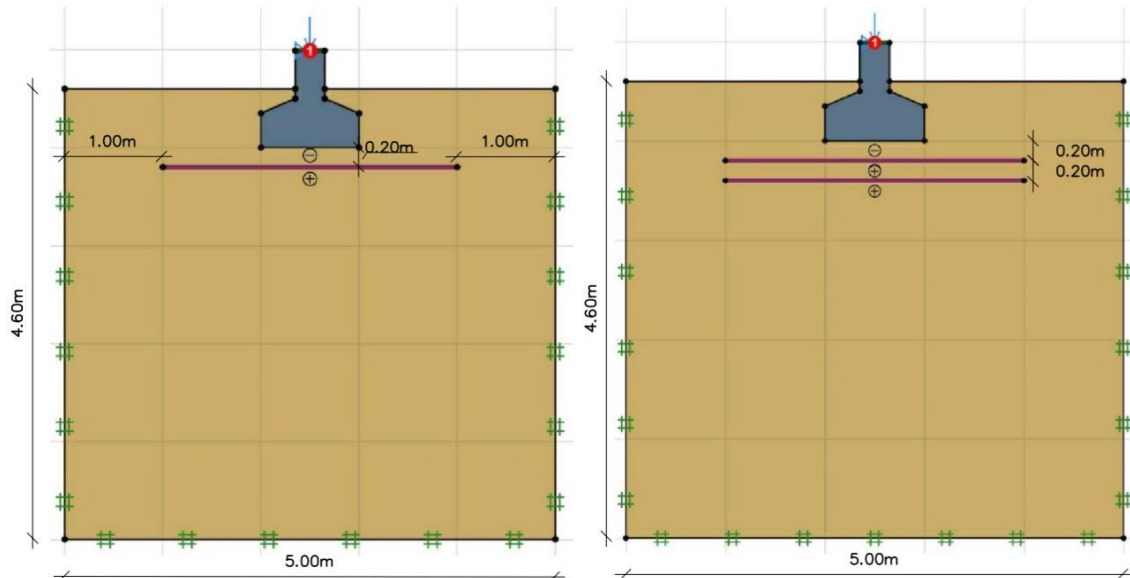
O segundo modelo representa o solo reforçado com 1 (uma) geogrelha, a qual tem as propriedades da MacGrid WG90, e o terceiro modelo representa o solo reforçado com 2 (duas) geogrelhas idênticas à anteriormente citada.

O espaçamento entre a base da sapata e a primeira camada da geogrelha (U), e o espaçamento vertical entre os reforços de geogrelha (h) foram definidos tomando como referência o estudo de Sharma *et al.* (2009) que obteve as seguintes conclusões:

- i. A primeira camada de reforço deverá estar situada próxima da base da sapata, a uma profundidade ótima de $U = 0,2B$ a $0,5B$ (onde B é a largura da sapata);
- ii. O espaçamento vertical (h) entre os reforços deverá estar entre $0,2B$ a $0,5B$;
- iii. A máxima profundidade total do sistema de reforço (d), deverá variar entre $1B$ e $2B$;

Dessa forma, optou-se por escolher uma configuração onde o espaçamento entre a base da sapata e a primeira geogrelha fosse de 20cm, e também 20cm de distância para a geogrelha seguinte no modelo SR2G, conforme mostra a Figura 17.

Figura 17: Modelo geométrico com uma e duas geogrelhas



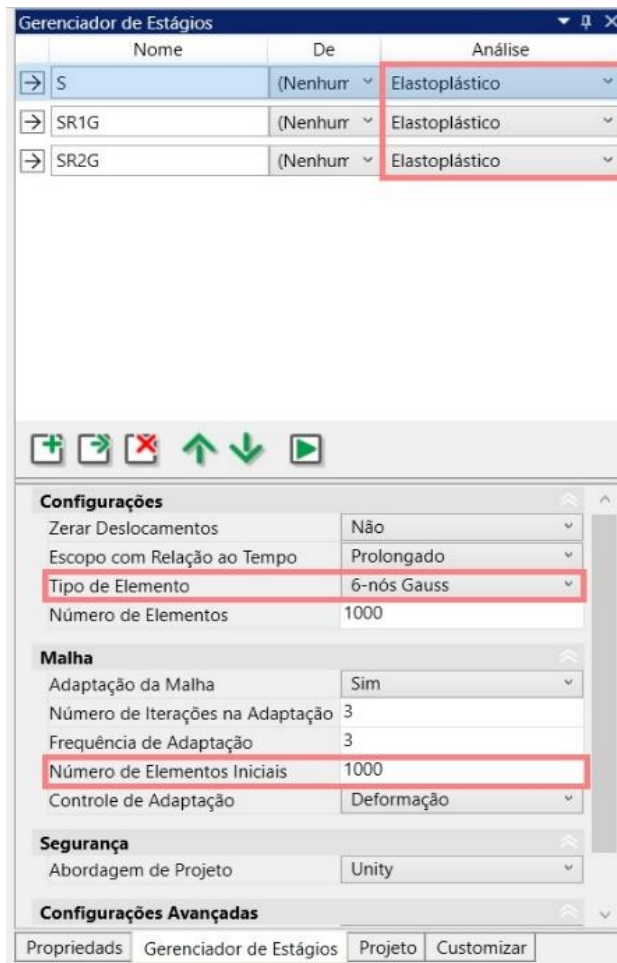
Fonte: A autora (2021)

4.2.2. Configurações da Malha

Uma malha em elementos finitos consiste em um conjunto de elementos e nós que são originados quando é realizada uma análise numérica durante a divisão do modelo. Dessa maneira, o modelo original é subdividido em pequenas partes, que juntas resultam em uma análise global do problema.

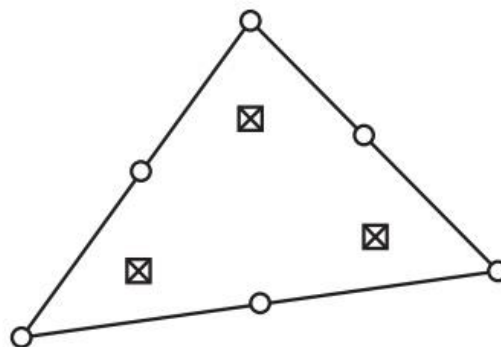
Para as configurações da malha em elementos finitos foram definidos os parâmetros mostrados na Figura 18, localizada na página seguinte, e o tipo de elemento foi o de 6 nós de Gauss.

Figura 18: Configurações da malha em elementos finitos



Fonte: A autora (2021)

Figura 19: Triângulo de 6 nós Gauss

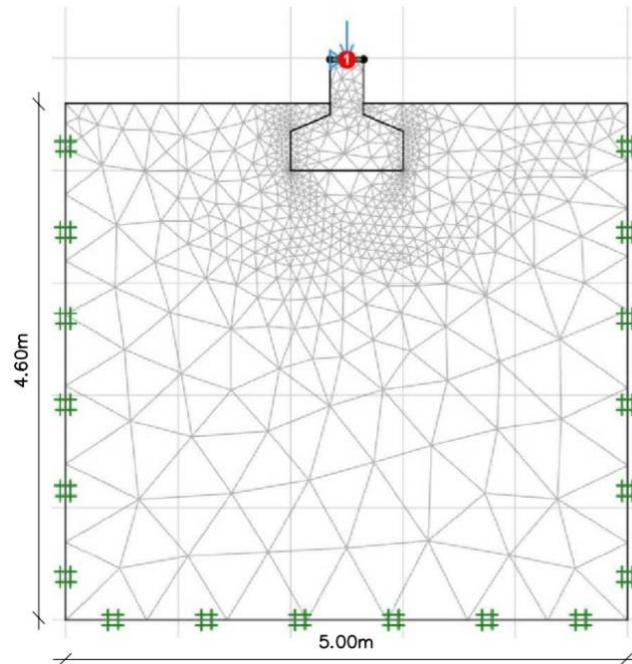


Fonte: Manual Optum G2 (2019)

Neste tipo de elemento de triângulo com 6 nós Gauss (Figura 19) é realizada uma interpolação quadrática de deslocamentos e interpolação linear de tensões. A

Figura 20, a seguir, mostra a malha de elementos finitos utilizada, circunscrevendo um número de 1000(mil) elementos finitos. O número de elementos foi escolhido conforme recomendação do Manual Optum G2 (2019) que afirma que aumentos na quantidade de elementos a partir de 1000 (mil) não são particularmente críticos e raramente irão melhorar significativamente as tensões calculadas.

Figura 20: Malha de elementos finitos do da modelagem com solo natural

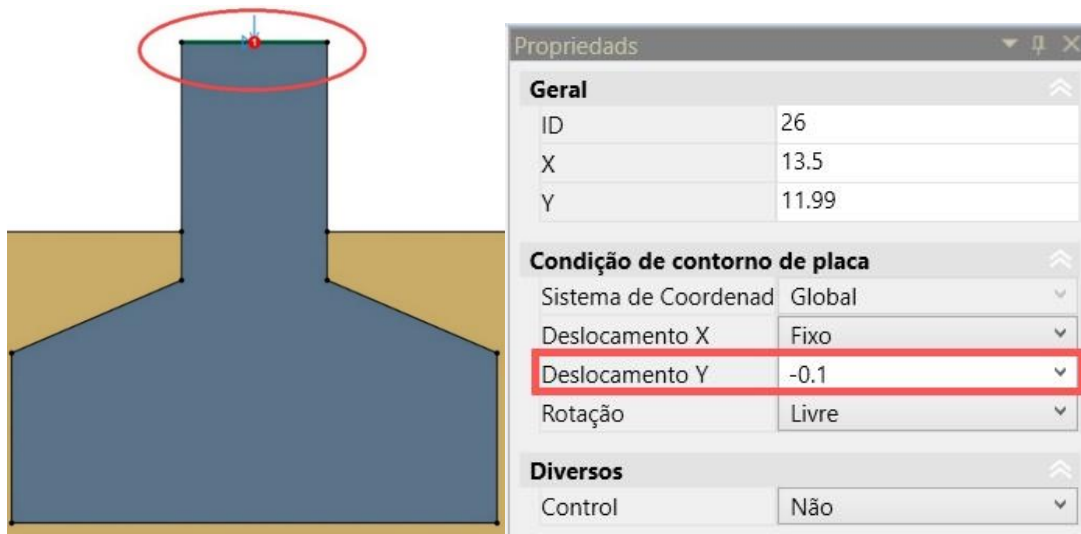


Fonte: A autora (2021)

4.2.3. Aplicação do Carregamento

Para a aplicação do carregamento foi necessário inserir uma placa rígida no topo da sapata, opção sugerida pelo Manual Optum G2 (2019), com peso específico nulo. Essa etapa foi necessária para que no meio da placa fosse adicionado um “Ponto de Análise” (opção também sugerida pelo Optum G2), no qual é possível especificar um deslocamento para o eixo y. Sendo assim, foi aplicado um deslocamento vertical em 100 incrementos até um máximo de -0,1m na placa rígida. Isso significa que a placa se desloca para baixo, e consequentemente empurra todo o sistema que está abaixo até a marca previamente definida de -0,1m. O sinal negativo significa que o deslocamento é no sentido para baixo. A figura 21, página seguinte, ilustra, na esquerda, o local onde foi adicionada a placa rígida e, na direita, a configuração das propriedades dessa placa.

Figura 21: Interface e configurações da placa rígida



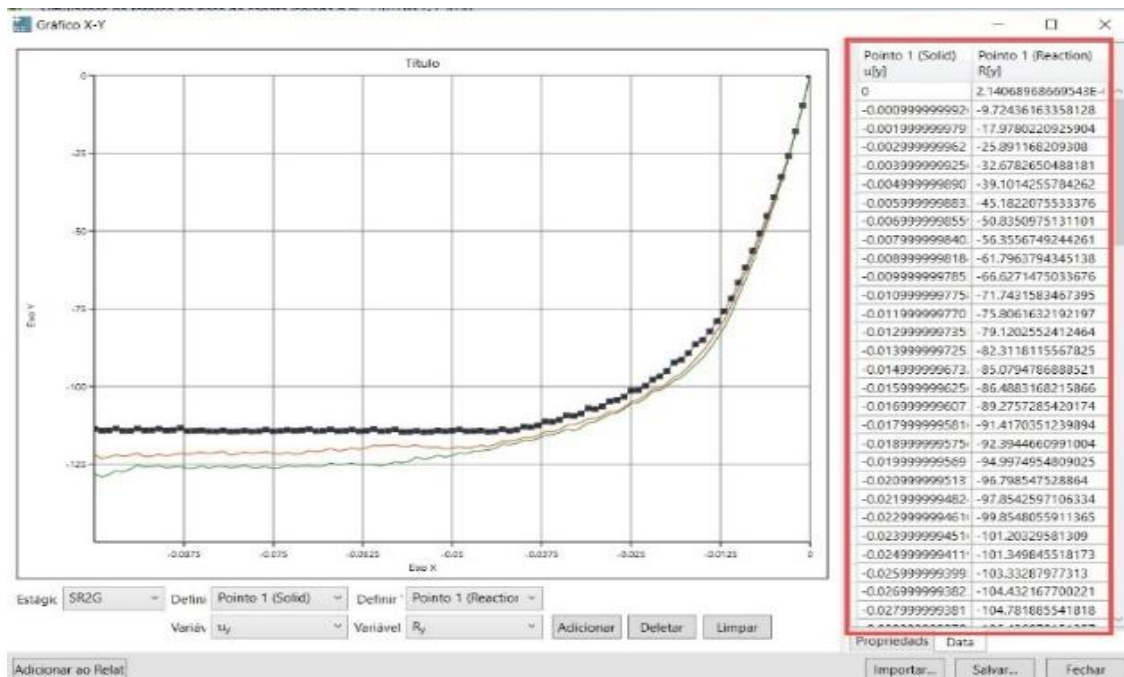
Fonte: A autora (2021)

4.3. OBTENÇÃO DOS RESULTADOS

Para obtenção de resultados, o Optum G2 fornece a opção de gerar um gráfico que apresenta os carregamentos referentes aos deslocamentos do ponto de análise até o limite imposto citado anteriormente.

Para gerar os gráficos, foi necessário ir até a aba "Gerar Gráficos", selecionar o modelo desejado, o eixo x para os valores de deslocamentos e o eixo y para os valores de carregamento. Na aba "Data" (Figura 22) são apresentados os 100 (cem) pontos de coordenadas do gráfico.

Figura 22: Obtenção dos Resultados



Fonte: O autor (2021)

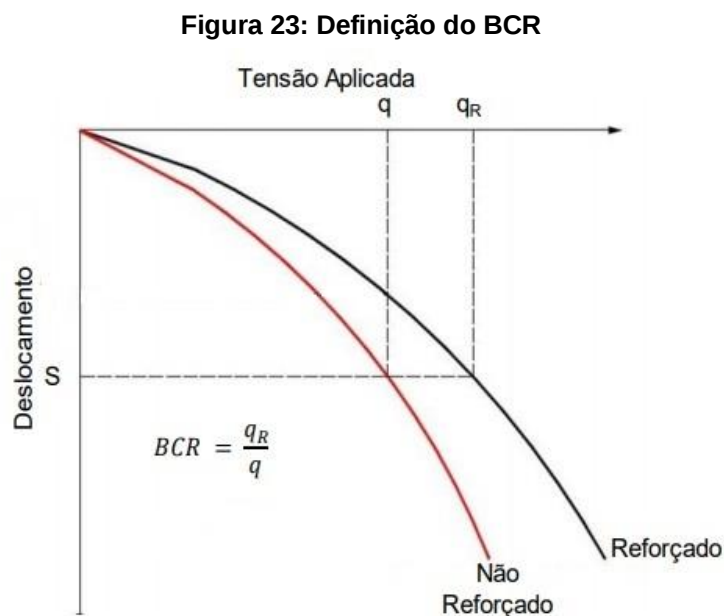
Posteriormente, esses pontos de coordenadas foram copiados para o Excel e estão apresentados nos Apêndices A, B e C.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico são apresentados os resultados obtidos na validação do solo e nas modelagens numéricas dos modelos apresentados na Tabela 1.

De acordo com Milititsky (2005), para dar uma noção de ordem de grandeza dos valores de recalque em fundações isoladas, pode-se usar as relações de limite de recalques diferenciais máximos admissíveis como sendo 25mm. Nesta pesquisa, como o intuito é avaliar o campo de deslocamento, formulando o gráfico tensão vs deformação, foram induzidos maiores recalques, até no máximo 100mm, como proposto no item 4.2.3.

Para avaliar os ganhos obtidos com a aplicação de geogrelhas como reforço de base de fundações rasas, foram desenvolvidas análises com a taxa de capacidade de suporte (BCR) proposta na literatura. Segundo Cicek *et al.* (2015), o BCR é um termo comumente utilizado para comparar valores de tensão medidos em solos reforçados e não reforçados. Ele é definido pela razão entre a tensão do solo reforçado e do não reforçado, dado um mesmo deslocamento. A Figura 23 expõe como a definição de BCR foi feita.



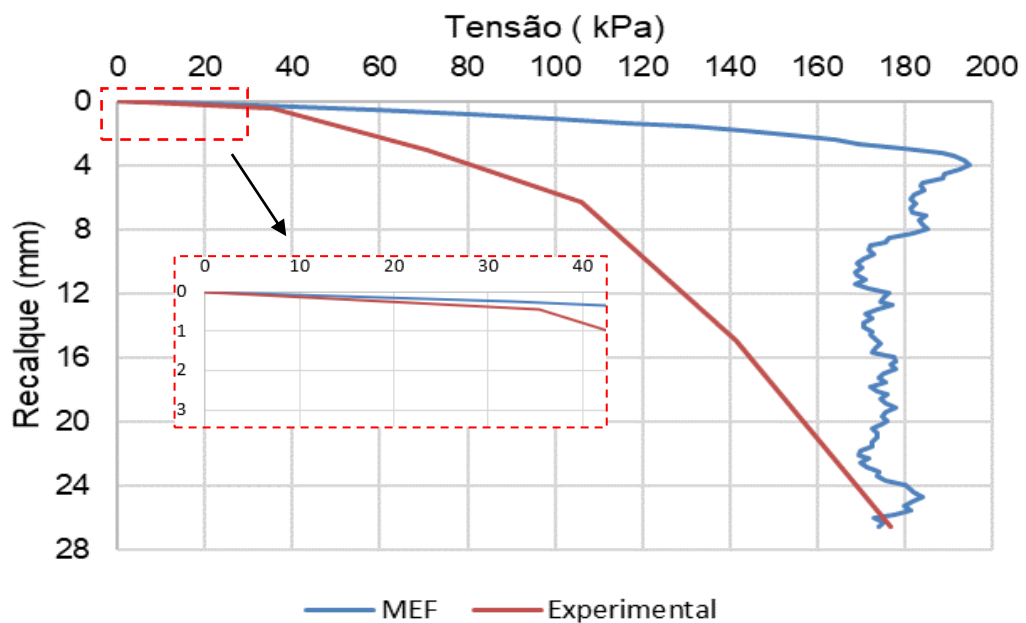
Fonte: Adaptado Cicek *et al.* (2015)

Posteriormente é realizado um estudo comparativo entre as tensões e os deslocamentos dos 3 (três) modelos numéricos com os resultados do Optum G2, bem como uma análise da força normal aplicada às geogrelhas de reforço.

5.1. VALIDAÇÃO NUMÉRICA DO SOLO

A Figura 24 apresenta resultados numéricos e os experimentais desenvolvidos por Lima (2019) de tensão vs. deformação do solo. Nela observa-se que o módulo de elasticidade de ambas as curvas está coerente, como visto pelo ângulo inicial das curvas. Além disso, as tensões finais coincidem em aproximadamente 176 kPa.

Figura 24: Validação do solo



Fonte: A autora (2021)

Apesar de ser observada uma diferença entre as áreas sob os gráficos, representando uma discrepância nos valores previstos de resiliência do material, enfatiza-se que esta diferença não é relevante para a presente análise, visto que se trata de um carregamento monotônico estático, portanto não havendo ciclos de histerese a serem afetados.

Portanto a validação é considerada um sucesso, indicando que o comportamento do solo está sendo corretamente simulado.

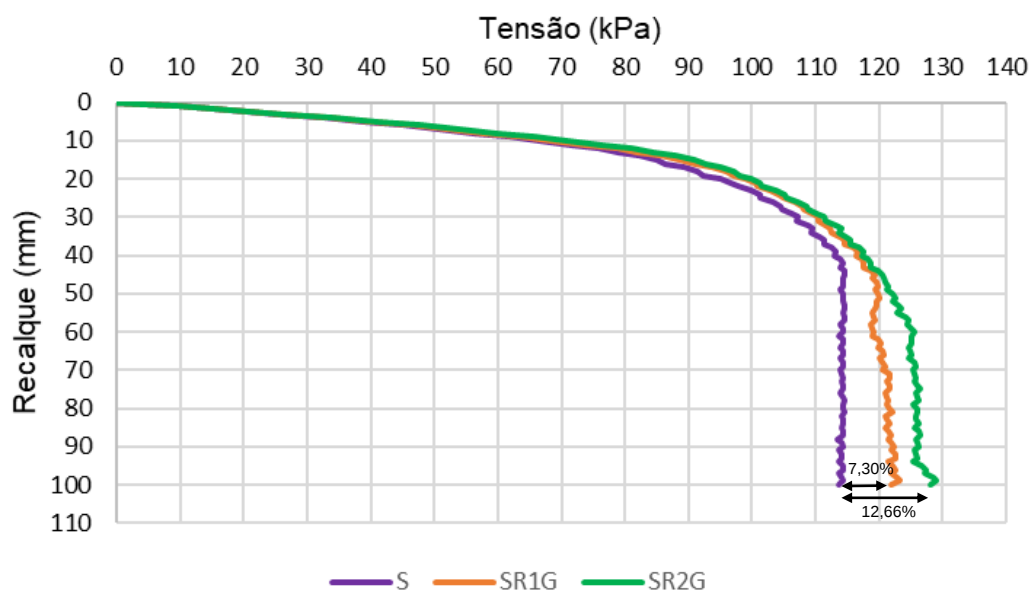
5.2. INFLUÊNCIA DO REFORÇO COM GEOGRELHA

Os relatórios (Apêndices A, B e C) fornecidos pelo Optum G2 apresentam os 100 pontos de coordenadas que formam o gráfico tensão vs. recalque das três

modelagens propostas. Foram analisados os resultados de tensão para dois valores de recalque: 25 mm correspondente ao recalque admissível de serviço e 100 mm correspondente ao recalque máximo analisado.

Verifica-se, analisando a Figura 25 e o relatório do Apêndice A, que a tensão admissível de serviço do solo natural, correspondente ao recalque de 25 mm, atingiu o valor de 101,35 kPa. Já a tensão correspondente ao valor de recalque máximo analisado pelo software, foi de 113,70 kPa.

Figura 25: Curvas de tensão vs. Recalque dos modelos S, SR1G e SR2G



Fonte: A autora (2021)

É observado que quanto maior o valor da carga solicitada, maior o deslocamento do solo. Isso ocorre porque o solo não reforçado movimenta-se livremente em resposta a um dado carregamento, visto que os grãos suportam sozinhos toda a tensão provocada pela fundação que está apoiada.

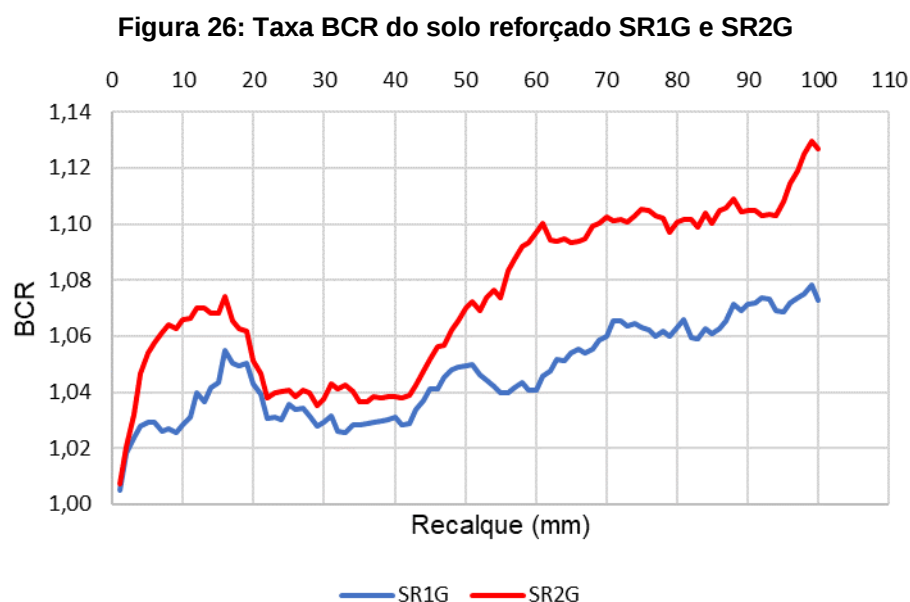
Constata-se um aumento da resistência do solo, quando da inclusão de 1 reforço com geogrelha. Ocorre um aumento da tensão admissível de serviço de 101,35 kPa (sem reforço) para 105,00 kPa (com 1 reforço da MacGrig W90), sendo a porcentagem de ganho de resistência igual a 3,60%. Já com relação ao deslocamento de 100mm, ocorreu um aumento na tensão de 113,70 kPa (sem reforço) para 122,00 kPa (com 1 reforço MacGrig W90), sendo a porcentagem de ganho igual a 7,30%. Tal percentual está coerente com as análises numéricas

observadas em outros trabalhos, visto que Fernandes (2019) encontrou um percentual de ganho igual a 7,80% ao realizar simulações numéricas de uma situação semelhante em solo diferente.

Com relação ao solo reforçado por 2 geogrelhas MacGrid W90, observa-se pelas curvas da Figura 25 que a inclusão delas também trouxe melhorias de resistência ao solo. Ocorre um aumento da tensão admissível de serviço de 101,35 kPa (sem reforço) para 105,50 kPa (com dois reforços), sendo a porcentagem de ganho de resistência igual a 4,10%. Quanto ao deslocamento de 100mm, ocorreu um aumento na tensão de 113,70 kPa (sem reforço) para 128,10 kPa (com dois reforços), sendo a porcentagem de ganho igual a 12,66%. Dessa forma, verifica-se que a segunda geogrelha proporciona um ganho adicional de resistência.

5.2.1. Valores da Taxa BCR

Os valores da taxa BCR do solo reforçado com 2 geogrelhas apresentaram-se maiores que a taxa BCR do solo reforçado com 1 geogrelha (Figura 26). Com relação ao deslocamento máximo, o BCR deixou de ser 1,07, aproximadamente, e passou a ser 1,10 quando adicionado a segunda geogrelha. De fato, não é uma crescente muito significativa, o que indica que existirá um limite no número de camadas de reforço, pois após esse limite, as geogrelhas não aumentarão mais a resistência do solo.

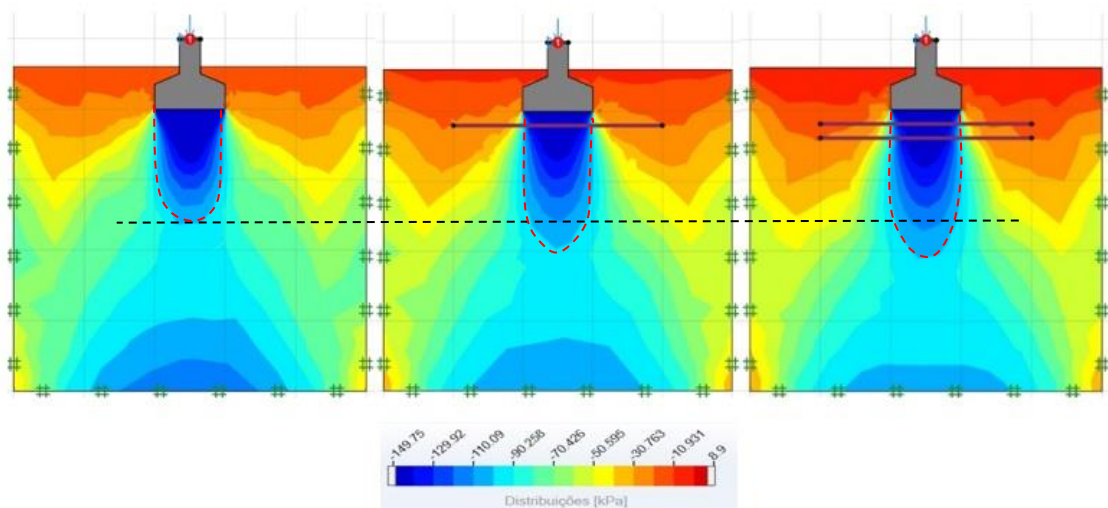


Fonte: A autora (2021)

5.2.2. Análise das Tensões

A seguir, a Figura 27 mostra um comparativo entre as tensões normais verticais, desenvolvidas nos modelos simulados. É possível verificar que com a inclusão das geogrelhas o solo conseguiu absorver maiores tensões no eixo vertical abaixo do centro da sapata e distribuir melhor as tensões nas camadas inferiores do maciço de solo, o que pode ser observado pelo aumento do bulbo de tensões (em azul escuro).

Figura 27: Tensões normais verticais dos modelos S, SR1G e SR2G

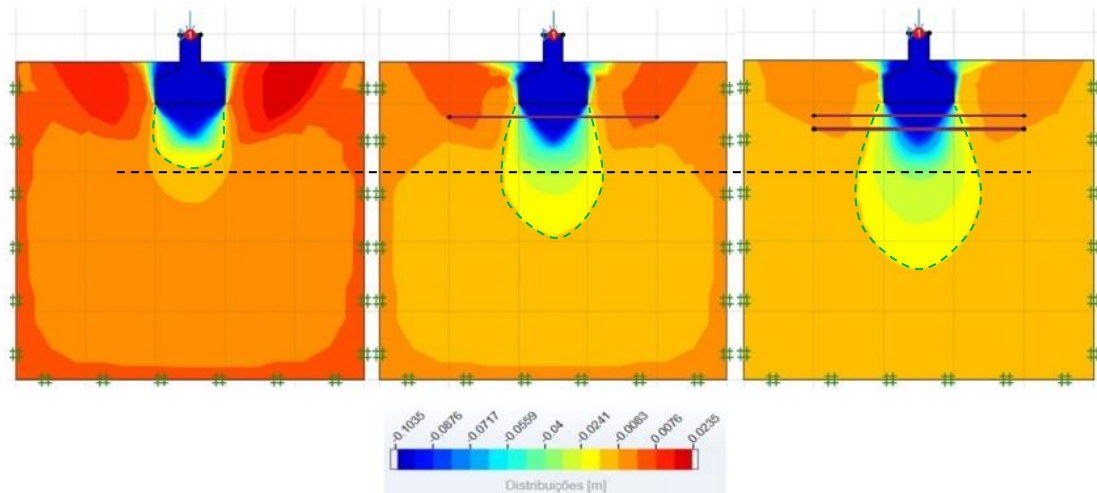


Fonte: A autora (2021)

5.2.3. Análise dos Deslocamentos Verticais

A Figura 28, página seguinte, mostra um comparativo entre os deslocamentos verticais desenvolvidos nos modelos simulados. Ressalta-se que os números negativos, apresentados na legenda significam que os deslocamentos são no sentido para baixo, já os positivos, no sentido para cima. Nota-se que a adição das geogrelhas fez com que uma porção maior do solo fosse mobilizada para um mesmo valor de recalque, resultando em tensões distribuídas por uma maior porção do solo e consequentemente maior capacidade de suporte do solo.

Figura 28: Deslocamentos verticais dos modelos S, SR1G e SR2G



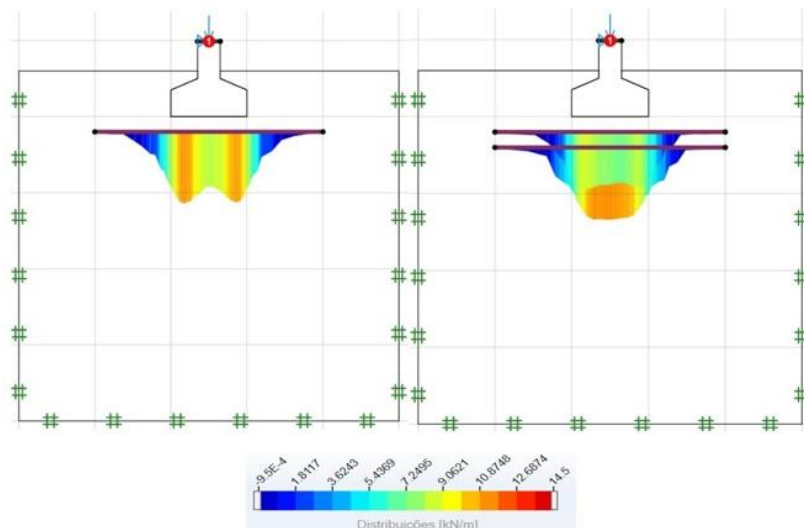
Fonte: A autora (2021)

5.2.4. Análise dos Esforços Normais na Geogrelha

A Figura 29 apresenta uma comparação entre as forças normais aplicadas sobre as geogrelhas para as duas configurações adotadas. Ela expõe que a adição da segunda geogrelha altera a distribuição da força normal ao longo do seu comprimento.

Ademais, os valores máximos do esforço normal são semelhantes nas duas configurações, o que indica que a segunda geogrelha proporciona um ganho de capacidade de carga para o solo semelhante àquele proporcionado pela primeira. Isso é confirmado pelos resultados demonstrados no item 5.2.

Figura 29: Esforços normais nas geogrelhas dos modelos SR1G e SR2G



Fonte: A autora (2021)

6. CONCLUSÃO

Este trabalho propôs, através de análise numérica, uma observação das tensões e deslocamentos do solo com o uso de geogrelhas como reforço de base de fundações rasas. Para atingir esse objetivo, esse trabalho partiu de um embasamento teórico através de profunda pesquisa em obras científicas, seguida da modelagem para validação do solo e da modelagem do reforço de base de fundações rasas, no programa geotécnico Optum G2. Realizados esses passos, pode-se obter os resultados e analisá-los.

O resultado da modelagem numérica desenvolvida para validação do solo foi considerado compatível com o resultado experimental. Os valores do módulo de elasticidade e tensões finais mostraram-se semelhantes ao estudo experimental e logo, os parâmetros de resistência da areia pouco compacta foram confiáveis.

Realizadas as modelagens da fundação rasa, do tipo sapata isolada, apoiada sobre o solo natural, e com geogrelhas da MacGrid W90 da empresa Maccaferri, as análises apresentadas comprovaram que a inclusão da camada de reforço no maciço de solo gera um aumento na capacidade de suporte (BCR), atenua as deformações e rearranja as tensões. Concebem-se, assim, as seguintes conclusões:

- A inclusão de 1 reforço da geogrelha MacGrid W90, promove o aumento de 3,60% na capacidade de carga na tensão admissível de serviço e na tensão máxima analisada um ganho de 7,30%.
- A inclusão de 2 reforços da geogrelha MacGrid W90, promove o aumento de 4,10% na capacidade de carga na tensão admissível de serviço e na tensão máxima analisada um ganho de 12,66%.
- As taxas de BCR foram de 1,07 para o solo reforçado com 1 geogrelha e 1,10 para o solo reforçado com 2 geogrelhas. Dessa forma, poderá existir um limite no número de camadas de reforço, o qual, adicionado mais camadas, essas não irão mais influenciar na redução do deslocamento da sapata isolada.
- Com o reforço a base da fundação consegue absorver maiores tensões verticais e permite uma redução na magnitude destas tensões nas camadas inferiores da base;
- A inclusão de uma segunda geogrelha proporciona um ganho de capacidade de carga para o solo semelhante àquele proporcionado pela primeira.

Conforme retratado, as geogrelhas aplicadas como reforço de base geram significativos benefícios aos solos. No entanto, salienta-se a importância de mais estudos numéricos criteriosos nesse tema. Em razão disso, sugere-se uma continuidade dos estudos envolvendo simulação de fundações rasas em solo reforçado. Propõe-se:

- Alterar os parâmetros geométricos de espaçamento entre a base da sapata e a primeira camada da geogrelha (U), espaçamento vertical entre os reforços de geogrelha (h), o tamanho da base da sapata (B) e o comprimento do reforço (L). Nessa pesquisa, os valores selecionados foram: U igual a 20cm, h igual a 20cm, B igual a 1m e L igual a 3m;
- Inserir mais camadas de reforço no maciço de fundação. Nessa pesquisa, foram utilizadas uma camada e duas camadas de reforço;
- Analisar numericamente a influência do tempo no desempenho da geogrelha;
- Estudar numericamente a influência dos parâmetros dos materiais na interface de contato entre o solo e a geogrelha;
- Realizar as simulações numéricas em outro programa computacional geotécnico para fins de comparação dos resultados obtidos.

REFERÊNCIAS

- ABRAMENTO, Maurício. **Geossintéticos em estruturas de contenção e taludes íngremes**. Curso sobre aplicações de geossintéticos em geotecnia e meio ambiente. São Paulo, 1998.
- AL-QADI, I. L., BRANDON, T. L., AND BHUTTA, A. (1997). **Geosynthetic Stabilized Flexible Pavements. Proceedings of Geosynthetics**, IFAI, Vol. 2, Long Beach, California, pp. 647-662.
- ALVES, L. M. **Modelagem e simulação do campo contínuo com irregularidades: Aplicações em Mecânica da Fratura com Rugosidade**. 2011. 313 f. Tese (Doutorado) - Curso de Métodos Numéricos em Engenharia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.
- ANTUNES, L. G. S. (2008). **Reforço de Pavimentos Rodoviários com Geossintéticos**. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM- 166/08, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 158p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. **NBR 6122: Projeto e execução de fundações**. Rio de Janeiro, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 10318-1: Geossintéticos Parte 1: Termos e definições**. Rio de Janeiro, 2018.
- BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. **Notas de aula de Estruturas de Concreto III**. Curso de graduação em Engenharia Civil. Universidade Estadual Paulista. Bauru, 2012. Disponível em: <<http://wwwp.feb.unesp.br/pbastos/concreto3/Sapatas.pdf>>. Acesso em: 12 fev. 2021
- BATHE, K. J. (1982). **Finite Element Procedures in Engineering Analysis**. New J.Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs.
- BILFINGER, W.; MELLO, L. G. F. S. **Reforços de Fundações. Manual Brasileiro de Geossintéticos**. 2ed.São Paulo: Blucher, 2015, v., p. 149-154.
- CANCELLI, A.; MONTANELLI, F.; ROMOLDI, P. & ZHAO, A. (1996). **Full scale laboratory testing on geosynthetics reinforced paved roads**. Proceedings of the Internacional Symposium on Earth Reinforcement, Volume 1, Japan, 1996. pp. 573-578.

CARDOSO, Antônio José de Magalhães Silva. **A técnica das pregagens em solos aplicada em escavações: métodos de análise e dimensionamento**. 496 f. Dissertação (doutorado em Engenharia Civil). – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 1987.

CHAKRABORTY, D.; KUMAR, J. **Bearing capacity of strip foundations in reinforced soils**. International Journal of Geomechanics, 2014.

CICEK, E., GULER, E., YETIMOGLU, T., (2015). **Effect of reinforcement length for different geosynthetic reinforcements on strip footing on sand soil**. Soils and Foundations. Elsevier. 55 (4). p. 661 – 677.

CONSOLI, N. C.; MILITITSKY, J.; SCHINAID, F. **Patologias das Fundações**. 1^a. ed. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2005. 191p.

FERNANDES, Hebert Detogne (2019). **Análise numérica da interação solo-geogrelha aplicada como reforço de maciços em fundações rasas**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ, 102p.

GERSKOVICH, D. M. (2017). **Modelos Constitutivos Hiperbólico**. Disponível em: <<http://www.eng.uerj.br/~denise/pdf/modelohiperbolico.pdf>>. Acesso em: 14 fev. 2021

GUIMARÃES, Adineli Gomes. **Análise inversa para determinação de parâmetros de deformabilidade de solos**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Viçosa. Minas Gerais, 2008.

HAAS, R., WALLS, J., AND CARROLL, R. G. (1988). **Geogrid Reinforcement of Granular Bases in Flexible Pavements**, Transportation Research Record 1188, pp. 19-27.

KURIAN, N.P., BEENA, K.S., and KUMAR, R.K. (1997). **Settlement of reinforced sand in foundations**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 123 (9), pp. 818-827.

LIMA, Gabriel Paiva Lessa. **Análise do Comportamento de um Solo Reforçado com Geogrelhas de Bambu Utilizando o Ensaio de Prava de Carga**. Instituto Federal de Sergipe. Aracaju, 2019.

LOPES, Ana Carolina das Chagas (2019). **Estudo de interação solo-geogrelha-estrutura de fundações rasas utilizando modelagem física com solos transparentes**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ, 146p.

MACAFERRI, América Latina. **Reforço de solos: Manual técnico**. São Paulo: Macaferri do Brasil, 2009. 169 p.

MAHARAJ D. K., (2003). **Nonlinear finite element analysis of strip footing oreinforced clay**. The Electronic Journal of Geotechnical Engineering, Vol.8, Bundle C.

MARIQUITOS, Ana Rita Parente (2017). **Implementação e validação de modelos plásticos não lineares para simular o comportamento dos solos**. Dissertação de Mestrado, Técnico Lisboa, Lisboa, 121p.

MEDEIROS, H. **Reforço Plástico**. Revista Técnica. N. 138, set. 2008. Disponível em: <http://www.revistatechne.com.br/engenharia-civil/138/imprime101848.asp>. Acesso em: 12 fev. 2021.

MILITITSKY, J.; CONSOLI, N. C.; SCHNAID, F. **Patologia das Fundações**. 2.ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 207 p.

NADER, José Jorge (1993). **Modelos elasto-plásticos para solos: o cam-clay e sua aplicação a diferentes trajetórias de tensão**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, Escola Politécnica da USP, São Paulo, SP, 108 p.

NADER, José Jorge (1999). **Hipoplasticidade e elastoplasticidade para solos**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola Politécnica da USP. São Paulo, 1999.

OLIVEIRA, Gabriel Xerez de. **Modelagem numérica de provas de carga em placa em solo colapsível**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil. Natal, RN, 2018.

OMAR, T.M. et al. **Ultimate bearing capacity of rectangular foundations on geogridreinforced sand**. Geotechnical Testing Journal, v. 16 n. 2 p, 246-52, 1993.

OPTUM G2. **Manual Técnico Optum G2: Theory.** Optum Computational Engineering. 2016.

OURIA, A.; MAHMOUDI, A. **Laboratory and numerical modeling of strip footing on geotextile-reinforced sand with cement-treated interface.** *Geotextiles and Geomembranes*, v. 46, p. 29–39, 2018.

PALMEIRA, Ennio Marques. **Geossintéticos em geotecnia e meio ambiente.** São Paulo: Oficina de Textos, 2018. 257p.

PIRES, Dario Menegasso. **Modelagem de um sistema elástico linear de pavimentos flexíveis e validação por meio do método de elementos finitos.** Florianópolis, 2018.

POTTS, D. M., Zdravkovic, I. (1999). **Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering.** Thomas Telford, London, England.

RECALQUE de fundações: o que é. **Guia da Engenharia**, 2019. Disponível em: <https://www.guiadaengenharia.com/recalque-fundacoes-conceitos/> Acesso em: 02 fev. 2021

SALL Oustasse Abdoulaye; SARR Déthié; BA Makhaly; CISSE Ndiaga; LY Aboubacry LY. **Numerical Analysis of Shallow Foundations in a Soil Mass under Various Behavior Laws.** *American Journal of Mechanical Engineering*. 2019.

SAYÃO, Alberto; SIEIRA, Ana Cristina; SANTOS, Petrucio. **Reforço de solos: Manual Técnico.** Jundiaí: Maccaferri, 2012.

SHARMA, R., CHEN, Q., ABU-FARSAKH, M., YOON, S. (2009). **Analytical modeling of geogrid reinforced soil foundation.** *Geotextiles and Geomembranes*. 27 (1), p. 63 - 72. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2008.07.002>.

SIEIRA, Ana Cristina Castro Fontenla. **Estudo Experimental dos Mecanismos de Interação Solo-Geogrelha.** 2003. 360 f. Tese (Doutorado em Ciências de Engenharia Civil: Geotecnia). - Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2003.

SORIANO, Humberto Lima. **Método de Elementos Finitos em Análise de Estruturas.** Brasil, São Paulo, Editora da Universidade de São Paulo, 2003.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ. **O Método dos Elementos Finitos.** Disponível em:

<<http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM266/Apostila/Introdu%C3%A7%C3%A3o%20ao%20MEF.pdf>>. Acesso em: 08 fev. 2021.

TERZAGHI, Karl.; PECK, Ralph B.; MESRI, Gholamreza. **Soil Mechanics in Engineering Practice.** 3. ed. Nova Iorque: John Wiley & sons, 1996.

TRAN, V. D. H. et al. **Three-dimensional analysis of geogrid-reinforced soil using a finite-discrete element framework.** International Journal of Geomechanics, 2015.

VELLOSO, Dirceu de Alencar; LOPES, Francisco de Rezende. **Fundações: critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais e fundações profundas.** São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

VERTEMATTI, J.C. **Manual Brasileiro de Geossintético.** Edgard Blucher, 1ª edição, São Paulo, Brasil. 2004.

XEREZ, Gabriel de Oliveira. **Modelagem numérica de provas de carga em placa em solo colapsível.** Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2018.

Apêndice A – Solo Natural

Tensão (kPa)	Deformação (mm)	Tensão (kPa)	Deformação (mm)
0,0000	0,0	114,4359	51,0
9,7244	1,0	114,2466	52,0
17,9780	2,0	114,5675	53,0
25,8912	3,0	114,6675	54,0
32,6783	4,0	114,3366	55,0
39,1014	5,0	114,5901	56,0
45,1822	6,0	114,5938	57,0
50,8351	7,0	113,8430	58,0
56,3557	8,0	114,3226	59,0
61,7964	9,0	114,4147	60,0
66,6271	10,0	113,7690	61,0
71,7432	11,0	114,2991	62,0
75,8062	12,0	114,4142	63,0
79,1203	13,0	113,9238	64,0
82,3118	14,0	114,3356	65,0
85,0795	15,0	114,4040	66,0
86,4883	16,0	113,8467	67,0
89,2757	17,0	114,3054	68,0
91,4170	18,0	114,3921	69,0
92,3945	19,0	113,7934	70,0
94,9975	20,0	114,1423	71,0
96,7985	21,0	114,3022	72,0
97,8543	22,0	114,0196	73,0
99,8548	23,0	114,3203	74,0
101,2033	24,0	114,4182	75,0
101,3498	25,0	113,9173	76,0
103,3329	26,0	114,3922	77,0
104,4322	27,0	114,4955	78,0
104,7819	28,0	114,2686	79,0
106,4370	29,0	114,4432	80,0
107,3147	30,0	114,5118	81,0
107,0519	31,0	114,1752	82,0
108,7514	32,0	114,4580	83,0
109,5399	33,0	114,4229	84,0
109,3684	34,0	114,1539	85,0
110,7751	35,0	114,3078	86,0
111,4735	36,0	114,3568	87,0

111,3152	37,0	113,4257	88,0
112,5166	38,0	114,0800	89,0
113,1198	39,0	114,2387	90,0
112,9705	40,0	113,6537	91,0
113,9863	41,0	114,1347	92,0
114,3433	42,0	114,2120	93,0
113,7859	43,0	113,5899	94,0
114,4852	44,0	114,3273	95,0
114,5857	45,0	114,3379	96,0
114,2380	46,0	113,5957	97,0
114,3991	47,0	114,1820	98,0
114,4154	48,0	114,2614	99,0
113,8667	49,0	113,6972	100,0
114,2496	50,0		

Apêndice B – Solo reforçado com 1 geogrelha

Tensão (kPa)	Deformação (mm)	Tensão (kPa)	Deformação (mm)
0,0000	0,0	120,1523	51,0
9,7726	1,0	119,5303	52,0
18,3064	2,0	119,6258	53,0
26,5114	3,0	119,4925	54,0
33,5911	4,0	118,8948	55,0
40,2506	5,0	119,1692	56,0
46,4982	6,0	119,3499	57,0
52,1516	7,0	118,7895	58,0
57,8825	8,0	118,9925	59,0
63,3873	9,0	119,0813	60,0
68,5077	10,0	118,9898	61,0
73,9629	11,0	119,7530	62,0
78,8163	12,0	120,3359	63,0
82,0245	13,0	119,7702	64,0
85,7423	14,0	120,4968	65,0
88,7769	15,0	120,7112	66,0
91,2204	16,0	119,9752	67,0
93,7480	17,0	120,6471	68,0
95,9445	18,0	121,0759	69,0
97,0444	19,0	120,6133	70,0
99,0596	20,0	121,6202	71,0
100,6034	21,0	121,7788	72,0
100,8309	22,0	121,2578	73,0
102,9419	23,0	121,7023	74,0
104,2713	24,0	121,6613	75,0
104,9736	25,0	121,0255	76,0
106,8077	26,0	121,2725	77,0
108,0263	27,0	121,5469	78,0
108,0680	28,0	121,1347	79,0
109,4221	29,0	121,6758	80,0
110,4349	30,0	122,0735	81,0
110,4504	31,0	120,9869	82,0
111,5854	32,0	121,2303	83,0
112,3422	33,0	121,6016	84,0
112,4811	34,0	121,0964	85,0
113,9105	35,0	121,4552	86,0
114,6893	36,0	121,8536	87,0

114,5795	37,0	121,5341	88,0
115,8700	38,0	121,9729	89,0
116,5354	39,0	122,4072	90,0
116,4984	40,0	121,8224	91,0
117,2266	41,0	122,5337	92,0
117,6444	42,0	122,5654	93,0
117,6376	43,0	121,4618	94,0
118,7448	44,0	122,1680	95,0
119,3052	45,0	122,5607	96,0
118,9354	46,0	121,9537	97,0
119,5845	47,0	122,7668	98,0
119,8845	48,0	123,2096	99,0
119,4377	49,0	121,9917	100,0
119,9128	50,0		

Apêndice C – Solo reforçado com 2 geogrelhas

Tensão (kPa)	Deformação (mm)	Tensão (kPa)	Deformação (mm)
0,0000	0,0	122,7144	51,0
9,7963	1,0	122,1458	52,0
18,3455	2,0	122,9916	53,0
26,7170	3,0	123,4298	54,0
34,1955	4,0	122,7435	55,0
41,2122	5,0	124,1129	56,0
47,7886	6,0	124,6123	57,0
53,9521	7,0	124,3242	58,0
59,9632	8,0	125,0173	59,0
65,6688	9,0	125,5209	60,0
71,0224	10,0	125,1661	61,0
76,5186	11,0	125,0608	62,0
81,1022	12,0	125,1357	63,0
84,6469	13,0	124,7283	64,0
87,9071	14,0	124,9902	65,0
90,8829	15,0	125,1551	66,0
92,8921	16,0	124,6530	67,0
95,1369	17,0	125,6372	68,0
97,1344	18,0	125,8816	69,0
98,1071	19,0	125,4398	70,0
99,8601	20,0	125,6941	71,0
101,3224	21,0	125,8967	72,0
101,5575	22,0	125,4994	73,0
103,8192	23,0	126,1052	74,0
105,2557	24,0	126,4782	75,0
105,4857	25,0	125,8360	76,0
107,2987	26,0	126,1512	77,0
108,6630	27,0	126,1804	78,0
108,9302	28,0	125,3632	79,0
110,1960	29,0	125,9727	80,0
111,3492	30,0	126,1432	81,0
111,6660	31,0	125,7791	82,0
113,2367	32,0	125,7997	83,0
114,1940	33,0	126,3138	84,0
113,7441	34,0	125,6198	85,0
114,8493	35,0	126,2729	86,0
115,5394	36,0	126,4675	87,0

115,6064	37,0	125,8088	88,0
116,7616	38,0	125,9966	89,0
117,4535	39,0	126,1897	90,0
117,3028	40,0	125,5629	91,0
118,3020	41,0	125,8733	92,0
118,7789	42,0	126,0436	93,0
118,6256	43,0	125,2857	94,0
119,9506	44,0	126,6602	95,0
120,4978	45,0	127,4480	96,0
120,6696	46,0	127,1041	97,0
120,8917	47,0	128,4475	98,0
121,5299	48,0	129,0781	99,0
121,3166	49,0	128,0924	100,0
122,2288	50,0		