



FACULDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO MESQUITA FILHO”

- CAMPUS DE GUARATINGUETÁ -

Maíra Cortez Galhardo

**ANÁLISES PARAMÉTRICAS DE COLUNAS GRANULARES
ENCAMISADAS COM TECIDO GEOSSINTÉTICO ATRAVÉS DO
SOFTWARE RINGTRAC®**

Guaratinguetá

2011

MAÍRA CORTEZ GALHARDO

ANÁLISES PARAMÉTRICAS DE COLUNAS GRANULARES ENCAMISADAS
COM TECIDO GEOSSINTÉTICO ATRAVÉS DO SOFTWARE RINGTRAC®

Projeto Integrado apresentado na
Disciplina Projeto Integrado II do
Departamento de Engenharia Civil,
da Faculdade de Engenharia do
Campus de Guaratinguetá,
Universidade Estadual Paulista,
como parte dos requisitos para a
obtenção do Diploma de
Graduação em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. George de Paula Bernardes

Co-orientador: Eng^a Cristina Francischetto Schmidt

G155a	Galhardo, Maira Cortez Analises paramétricas de colunas granulares encamisadas com tecido geossintético através de software Ringtrac / Maira Cortez Galhardo. – Guaratinguetá : [s.n], 2011. 74 f. Bibliografia : f. 74 Trabalho de Graduação em Engenharia Civil – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011. Orientador: Prof . Dr. George de Paula Bernardes Co Orientador: Profa. Dra. Cristina Francischetto Schmidt 1. Geotêxteis 2. Colunas I.Título CDU 624.13
-------	--



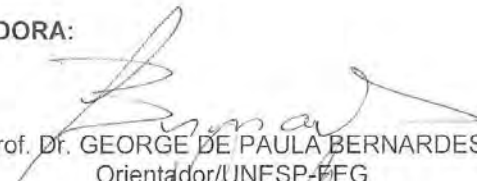
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE DO
REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA CIVIL"

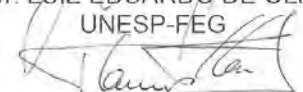
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL


Prof. Dr. Silvio Jorge Coelho Simões
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. GEORGE DE PAULA BERNARDES
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. LUIZ EDUARDO DE OLIVEIRA
UNESP-FEG


Eng.º FLÁVIO MONTEZ
HUESKER LTDA

Novembro de 2011

Dedico este trabalho à minha família: Nena, Dorinha e Tauan e ao meu namorado Marco, por todo o incentivo, paciência e apoio durante todos esses anos.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus e à espiritualidade, por nos momentos de paz e alegria guiarem meu pensamento, e nos momentos difíceis serem meu consolo, dando-me forças e esperanças para seguir com equilíbrio e procurar sempre ser uma boa aluna nesta escola que é a vida.

Aos meus amados pais: Nena e Dorinha, agradeço pelo o amor incondicional, pelo sacrifício próprio durante muitos anos para o investimento em minha formação e principalmente, por não terem me deixado desistir da engenharia.

Ao meu irmão Tauan, por torcer pelo meu sucesso.

Ao meu amado companheiro Marco, por todo o amor, paciência e incentivo.

Ao meu orientador George, por sua atenção, boa vontade e auxílio em todas as horas prescindidas.

A todo o pessoal da Huesker onde trabalhei, por toda confiança e apoio desta excelente empresa, especialmente à engenheira Cristina Schmidt, pela ajuda e exemplo de profissionalismo e dedicação.

Aos meus amigos, por estarem sempre ao meu lado: Camila, Débora, Gabriel, Amanda, Bruno.

Aos amigos da faculdade: Duda, Fabiana, Danielle, Leonardo, Felipe, Marisa, Beatriz e Adriana por todos os momentos vividos ao longo desses sete anos, inesquecíveis, de grande aprendizado de vida.

Aos professores pelos ensinamentos em engenharia, e aos mestres que encontrei, pela sabedoria para uma vida toda.

Aos funcionários da FEG, da biblioteca, do pólo computacional, pelo ótimo atendimento e atenção nesses anos todos. E a todos que puderam contribuir para este trabalho.

“Sê humilde para evitar o orgulho,
mas voa alto para alcançar a
sabedoria.”

Santo Agostinho

GALHARDO, M. C. **Análises Paramétricas De Colunas Granulares Encamisadas Com Geossintético Através Do Software Ringtrac®.** Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

RESUMO

Este trabalho buscou uma avaliação preliminar do comportamento de um sistema de melhoria de solo, com o uso de colunas de material granular encamisadas com tecido geossintético (colunas Ringtrac®).

Esta avaliação foi realizada através do software Ringtrac® (desenvolvido pela empresa Huesker GmbH, na Alemanha), onde buscou-se variar diferentes parâmetros de solo tais como Módulo Oedométrico, ângulo de atrito do solo, espessura do solo mole e a altura do aterro a ser inserido sobre este solo. A cada análise realizada, variou-se um parâmetro diferente e manteve-se fixo os outros parâmetros considerados, resultando em um total de 726 análises. Foram considerados válidos apenas os resultados onde a deformação radial do tecido geossintético não ultrapassou o valor de 4%, que é o valor máximo de deformação radial do geossintético adotado pelo programa Ringtrac®.

Os resultados dessas análises são mostrados graficamente neste estudo, avaliando-se os valores de tensão na coluna e recalques obtidos em cada análise.

Pôde-se comprovar preliminarmente neste estudo que a variação do ângulo de atrito do solo em que será executado a coluna Ringtrac®, não afetará significativamente os valores de tensão sobre a coluna e recalques no solo. E ainda, que a variação do Módulo Oedométrico do solo em que será executada a coluna afetará significativamente os valores de tensão na coluna e os valores de recalque do solo.

PALAVRAS-CHAVE: Geossintéticos, Colunas Encamisadas

GALHARDO, M. C. **Parametric Analyses of Geosintetics Encased Columns Using the Software Ringtrac®**. Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

ABSTRACT

This study attempts a preliminary assessment of the behavior of a soil improvement system with the use of encased columns of granular material with geosynthetic (columns Ringtrac®).

This evaluation was performed using the software Ringtrac® (developed by Huesker GmbH, Germany), which required different parameters such as soil Oedometric Module, friction angle of soil, thickness of soft soil and the embankment height. In each analysis, one parameter was varied and the other different parameters considered were fixed, resulting in a total of 726 results. Were considered valid only the results where the radial deformation of the geosynthetic encased column did not exceed the value of 4%, which is the maximum radial deformation of the geosynthetic adopted by the Ringtrac® program.

The analysis results are shown graphically in this study, evaluating the tension values in the column and obtained settlements in each analysis.

It's proven in this preliminary study that the variation of the soft soil friction angle in the Ringtrac® column, will not significantly affect the values of strain on the tension in the column and settlements on the ground. Furthermore, the variation of Oedometric Module on the soil, will significantly affect the tension values in the column and the settlements in the soil.

KEY-WORDS: Geosynthetic, Encased Columns

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Gráfico grau de adensamento x fator profundidade x fator tempo (fonte: http://www.eng.uerj.br/~denise/pdf/compressibilidadeadensamento.pdf)	22
Figura 2 – Curva de adensamento: porcentagem de recalque x fator tempo (Fonte: http://www.eng.uerj.br/~denise/pdf/compressibilidadeadensamento.pdf)	23
Figura 3 – Exemplo de transferência de carga do aterro para o solo- efeito de arqueamento (Kempfert., 2004) (fonte: http://repositorio.bce.unb.br/bitstream/10482/3776/1/2006_Sandra%20Patricia%20Echeverria%20Fernandez.pdf)	24
Figura 4 – Padrão de drenagem radial (fonte: www.igs.com.br)	26
Figura 5- Ensaio de tração em faixa larga (NBR 12.824); (fonte: Manual Brasileiro de Geossintéticos)	28
Figura 6- (a) Relação de resistência de tração T e elongação ϵ ; (b) Relação de resistência à tração T e temperatura θ de um material geossintético; (fonte: Manual Brasileiro de Geossintéticos)	29
Figura 7 - Curva ϵ x t(fluência) :ensaios de fluência para diferentes níveis de carregamento (T), com temperatura fixa. (fonte: Manual Brasileiro de Geossintéticos)	30
Figura 8 - Exemplo de uma coluna Ringtrac® (fonte: www.huesker.com.br)	35
Figura 9 – Esquema de um aterro executado sobre colunas encamisadas com geossintéticos sobre solo mole (Raithel;Kempfert, 2000); (fonte: Almeida, Marcio: Aterro Sobre Solos Moles)	35
Figura 10 – Execução de colunas encamisadas pelo método de deslocamento (Raithel, Kempfert, 2000); (fonte: catálogos da empresa Huesker)	41
Figura 11 – Execução de coluna Ringtrac® (fonte: www.huesker.com.br)	41
Figura 12 – Modelo de cálculo com as tensões com as tensões atuantes na coluna (Raithel, Kempfert, 2000)	44
Figura 13 – Exemplo de dimensionamento no programa Ringtrac®, com os parâmetros a serem considerados no cálculo dos recalques e tensões atuantes nos estados limites	49
Figura 14 – Resultado de análise para estado limite última no programa Ringtrac®	51
Figura 15 – Resultado da análise para estado limite de serviço no programa Ringtrac®	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações técnicas do geocomposto Ringtrac® de PVA	38
Tabela 2 – Especificações técnicas do geocomposto Ringtrac® de PET	39

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Módulo de Rigidez do Ringtrac® vs Tensão no Topo da Coluna para $E_{oed} = 500 \text{ kN/m}^2$	55
Gráfico 2: Módulo de Rigidez do Ringtrac® vs Tensão no Topo da Coluna para $E_{oed} = 1000 \text{ kN/m}^2$:	55
Gráfico 3: Módulo de Rigidez do Ringtrac® vs Tensão no Topo da Coluna para $E_{oed} = 1500 \text{ kN/m}^2$:	56
Gráfico 4: Módulo de Rigidez do Ringtrac® vs Tensão no Topo da Coluna para $E_{oed} = 500 \text{ kN/m}^2$:	57
Gráfico 5: Módulo de Rigidez do Ringtrac® vs Tensão no Topo da Coluna para $E_{oed} = 1000 \text{ kN/m}^2$:	57
Gráfico 6: Módulo de Rigidez do Ringtrac® vs Tensão no Topo da Coluna para $E_{oed} = 1500 \text{ kN/m}^2$:	58
Gráfico 7: Módulo de Rigidez do Ringtrac® vs Tensão no Topo da Coluna para $E_{oed} = 500 \text{ kN/m}^2$:	59
Gráfico 8: Módulo de Rigidez do Ringtrac® vs Tensão no Topo da Coluna para $E_{oed} = 1000 \text{ kN/m}^2$:	59
Gráfico 9: Módulo de Rigidez do Ringtrac® vs Tensão no Topo da Coluna para $E_{oed} = 1500 \text{ kN/m}^2$:	60
Gráfico 10: Módulo de Rigidez do Ringtrac® vs Recalque para $E_{oed} = 500 \text{ kN/m}^2$	61
Gráfico 11: Módulo de Rigidez do Ringtrac® vs Recalque para $E_{oed} = 1000 \text{ kN/m}^2$	62
Gráfico 12: Módulo de Rigidez do Ringtrac® vs Recalque para $E_{oed} = 1500 \text{ kN/m}^2$	62
Gráfico 13: Módulo de Rigidez do Ringtrac® vs Recalque para $E_{oed} = 500 \text{ kN/m}^2$	63
Gráfico 14: Módulo de Rigidez do Ringtrac® vs Recalque para $E_{oed} = 1000 \text{ kN/m}^2$	64
Gráfico 15: Módulo de Rigidez do Ringtrac® vs Recalque para $E_{oed} = 1500 \text{ kN/m}^2$	64
Gráfico 16: Módulo de Rigidez do Ringtrac® vs Recalque para $E_{oed} = 500 \text{ kN/m}^2$	65
Gráfico 17: Módulo de Rigidez do Ringtrac® vs Recalque para $E_{oed} = 1000 \text{ kN/m}^2$	66

Gráfico 18: Módulo de Rigidez do Ringtrac® vs Recalque para $E_{oed} = 1500$ kN/m ²	66
Gráfico 19: Módulo de Rigidez do Ringtrac® vs Tensão na Coluna para $\varphi = 20^\circ$	68
Gráfico 20: Módulo de Rigidez do Ringtrac® vs Tensão na Coluna para $\varphi = 22^\circ$	68
Gráfico 21: Módulo de Rigidez do Ringtrac® vs Tensão na Coluna para $\varphi = 24^\circ$	69
Gráfico 22: Módulo de Rigidez do Ringtrac® vs Recalque para $\varphi = 20^\circ$	70
Gráfico 23: Módulo de Rigidez do Ringtrac® vs Recalque para $\varphi = 22^\circ$	70
Gráfico 24: Módulo de Rigidez do Ringtrac® vs Recalque para $\varphi = 24^\circ$	71

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVO.....	14
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
3.1. SOLOS MOLES	15
3.1.1. Solos moles de origem fluvial	15
3.1.2. Solos moles de origem marinha	16
3.2. TEORIA DO ADENSAMENTO.....	16
3.2.1. Grau de adensamento	17
3.2.2. Coeficiente de Compressibilidade.....	19
3.2.3. Coeficiente de Adensamento	19
3.2.4. Equação diferencial de adensamento	19
3.2.5. Solução analítica.....	20
3.2.6. Porcentagem de Adensamento:	20
3.4. ATRITO NEGATIVO	25
3.5. DRENAGEM RADIAL	26
3.6. GEOSSINTÉTICOS	26
3.7. PROPRIEDADES RELEVANTES DOS GEOSSINTÉTICOS.....	28
3.7.1. Resistência/deformação/rigidez à tração:	28
3.7.2. Comportamento em fluência sob tração:	29
3.7.3. Resistência à esforços de instalação:.....	30
3.7.4. Resistência à degradação ambiental:	30
3.7.5. Interação mecânica com o solo envolvente:.....	31
3.7.6. Fatores de redução:.....	32
3.8. COLUNAS DE MATERIAL GRANULAR ENCAMISADAS COM GEOSSINTÉTICO.....	34
3.9. COMPORTAMENTO GLOBAL DE ATERROS SOBRE COLUNAS GRANULARES	36

3.10.TECIDO GEOTÊXTIL RINGTRAC®	37
3.10.1. Propriedades do geotêxtil de PVA (Polivinil Álcool)	37
3.10.2. Propriedades do geotêxtil de PET (Polietileno):	39
3.11. METODOLOGIA EXECUTIVA DE UMA COLUNA ENCAMISADA COM GEOTÊXTIL	40
3.11.1. Execução com deslocamento lateral de solo mole	40
3.11.2. Execução sem deslocamento lateral de solo mole:	42
3.12. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO:	42
3.13. MÉTODOS DE CÁLCULO PARA DIMENSIONAMENTO DA COLUNA	43
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	48
4.1. PROGRAMA RINGTRAC®.....	48
4.2. ANÁLISES PARAMÉTRICAS COM O USO DO SOFTWARE RINGTRAC®.....	52
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES DAS ANÁLISES PARAMÉTRICAS	54
5.1. Módulo Oedométrico	54
5.2. Ângulo de atrito do solo mole.....	67
6. CONCLUSÕES	71
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento de práticas de melhoria de solo utilizando-se materiais naturais, remota desde tempos antigos, desde muito antes da era Cristã (aproximadamente 3.000 a.C). O emprego de materiais sintéticos para reforço de solo se iniciou por volta da década de 1930, na Alemanha e se difundiu mundo a fora a partir da década de 1960.

No Brasil, há grande necessidade de implementação desses tipos de técnicas de melhoria de solos moles, devido à grande quantidade desses tipos de solos encontrados em quase todo o território. Além disso, essas técnicas otimizam o custo, a geometria da obra, a demanda por maiores quantidades de materiais.

Técnicas de melhoria de solo, como as fundações com colunas de material granular encamisadas com tecidos geotêxteis, que podem ser executadas tanto com areia quanto brita, são cada vez mais difundidos na construção civil, principalmente para aterros sobre solos moles ou muito moles, onde a carga a ser aplicada no solo é relativamente alta, a execução da coluna é de fácil execução, devido à baixa resistência e capacidade de suporte do solo.

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é realizar um estudo paramétrico de colunas de areia encamisadas com geossintéticos (colunas Ringtrac®) no software Ringtrac®, e verificar seu comportamento diante de diferentes parâmetros de solo, cargas aplicadas e módulos de rigidez do geotêxtil utilizado.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. SOLOS MOLES

Solos moles são solos sedimentares de baixíssima resistência à penetração, com valores de ensaio SPT inferiores a 4 golpes. Solos moles são em geral, argilas moles ou areias argilosas fofas formadas durante o Quaternário, período marcado por quatro grandes eras glaciais que causaram os mais variados efeitos nas taxas de deposição, na pedogênese, nos regimes fluviais no planeta Terra.

Os ambientes de deposição podem ser os mais variados possíveis, desde o fluvial – o deltaico-lacustre – até o costeiro, incluindo-se as lagoas e baías (Christofolletti, 1980). Eles distinguem-se que pelo meio de deposição (água doce, salgada ou salobra), quer pelo processo de deposição (fluvial ou marinho) ou ainda pelo local de deposição (várzeas ou planícies de inundação, praias, canais de mar). A deposição depende da litologia da área de erosão, do seu clima e da forma de transporte de sedimentos. Os depósitos sedimentares diferem entre si em função dessas condições ambientais, que variam no espaço e no tempo (Massad, 2003).

Os fatores que afetam a sedimentação desses solos são: presença de matéria orgânica, salinidade e floculação de partículas, velocidade da água e quantidade e composição da matéria em suspensão na água.

3.1.1. Solos moles de origem fluvial

Também conhecidos como aluviões, são solos formados a partir da deposição de sedimentos em planícies de inundação ou várzeas de rios, onde os sedimentos mais finos se decantam nas áreas mais baixas da planície, pouco drenadas, podendo ser sobreadensadas devido aos ressecamentos a

que estão sujeitas. É um tipo de solo heterogêneo, horizontalmente e verticalmente, devido à sua formação e ao curso dos nossos rios.

3.1.2. Solos moles de origem marinha

Existem dois tipos de sedimentos que formaram os solos de origem marinha. Eles foram originados de dois ciclos de sedimentação no Quaternário: um no Pleistoceno e outro no Holoceno.

O primeiro tipo de sedimento é argiloso (argilas transicionais) ou arenoso na sua base e arenoso em seu topo (areia transgressiva). Essa sedimentação ocorreu há 120.000 anos no período Pleistoceno do Quaternário, num episódio de ingressão do mar no continente.

O segundo tipo de sedimento, formado no término da última glaciação (Holoceno), há mais ou menos 7.000 anos atrás, originou areias e argilas formadas muitas vezes por sedimentação de águas paradas ou mais tranquilas, ou formados por retrabalhamento dos sedimentos do período Pleistoceno.

3.2. TEORIA DO ADENSAMENTO

Adensamento é definido como o recalque causado pela expulsão da água dos vazios do solo.

As hipóteses da Teoria de Adensamento Unidimensional de Terzagui são:

- Solo é totalmente saturado;
- A compressão é unidimensional;
- O fluxo d'água é unidimensional;
- Solo é homogêneo;

- As partículas sólidas e a água são praticamente incompressíveis perante a incompressibilidade do solo;
- O solo pode ser estudado como elementos infinitesimais, mesmo sendo constituído de partículas e vazios;
- O fluxo é regido pela Lei de Darcy;
- As propriedades do solo não variam no processo de adensamento (adotado), porém sabe-se que na prática as propriedades do mudam a medida que ocorre o adensamento, mas o resultado final das variações das propriedades não é muito grande e seus efeitos se compensam.
- O índice de vazios varia linearmente com o aumento da tensão efetiva durante o processo de adensamento. Essa hipótese permite que se associe o aumento da pressão efetiva e a pressão neutra correspondente , com o desenvolvimento de recalques com o grau de adensamento.

As três primeiras hipóteses indicam que a teoria se restringe ao caso de compressão oedométrica, com fluxo unidimensional e solos saturados.

3.2.1. Grau de adensamento

É definido como a relação entre a deformação ocorrida num elemento em uma certa posição, com uma profundidade z , num determinado tempo ε e a deformação deste elemento quando todo o processo de adensamento tiver ocorrido (ε_f):

$$U_z = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_f} \quad (1)$$

A deformação final devido ao acréscimo de tensão é:

$$\varepsilon = \frac{(e_1 - e_2)}{(1 + e_1)} \quad (2)$$

Onde: e = índice de vazios;

Segundo Souza Pinto, Carlos o Grau de Adensamento é a relação entre a variação do índice de vazios até um instante t e a variação total do índice de vazios devido ao carregamento.

Na análise de tensões efetivas, considera-se um elemento de solo submetido à pressão efetiva σ_1 com um índice de vazios e_1 . Ao ser aplicado um acréscimo de pressão total $\Delta\sigma$, surge instantaneamente uma pressão neutra u_i , de mesmo valor e não há variação de índice de vazios. Com o passar do tempo, a pressão neutra irá se dissipar até que todo o acréscimo de pressão aplicada seja suportado pela estrutura sólida do solo e o índice de vazios se reduzirá a e_2 .

$$U_z = \frac{\bar{\sigma} - \bar{\sigma}_1}{\bar{\sigma}_2 - \bar{\sigma}_1} \quad (3)$$

Onde: $\sigma_2 = \sigma_1 - \Delta\sigma$

A porcentagem de adensamento em função das pressões neutras é:

Instante do carregamento: $u_1 = \Delta\sigma = \bar{\sigma}_2 - \bar{\sigma}_1$

Final do adensamento: $u_2 = (\bar{\sigma}_2 - \bar{\sigma}_1) - (\bar{\sigma}_2 - \bar{\sigma}_1) = 0$

A expressão de U_z em função das pressões efetivas fica:

$$U_z = \frac{u_1 - u}{u_1} \quad (4)$$

O grau de adensamento é igual ao grau de dissipação de pressões neutras, ou seja, é a relação entre a pressão neutra dissipada até o instante t e a pressão neutra total que o carregamento implica no solo e que vai se dissipar durante o adensamento.

3.2.2. Coeficiente de Compressibilidade

Admitindo-se que a variação entre tensões efetivas e índices de vazios é linear, o coeficiente de compressibilidade a_v é tido como a inclinação da reta e , como a cada variação da tensão efetiva corresponde uma variação de pressão neutra de igual valor, mas de sentido contrário, tem-se que:

$$a_v = \frac{de}{du} \quad (5)$$

3.2.3. Coeficiente de Adensamento

Por definição, o coeficiente de adensamento C_v é dado por:

$$C_v = \frac{k(1 + e)}{a_v \cdot \gamma_o} \quad (6)$$

Onde: k = coeficiente de permeabilidade do solo;

e = índice de vazios;

a_v = coeficiente de compressibilidade;

γ_o = peso específico da água.

3.2.4. Equação diferencial de adensamento

A equação diferencial de adensamento mostra a variação de pressão ao longo da profundidade através do tempo. A variação de pressão neutra é a indicação da própria variação de recalques. A equação diferencial é dada por:

$$C_v = \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (7)$$

3.2.5. Solução analítica

A solução analítica se dá através do cálculo de duas variáveis:

- Fator de profundidade:

$$Z = \frac{z}{Hd} \quad (8)$$

Onde: z = distância do topo da camada incompressível até o ponto considerado [cm];

Hd = comprimento de drenagem, ou seja, comprimento de maior trajetória vertical percorrido pela partícula de água até atingir a fronteira drenante.

-Fator tempo:

$$T = \frac{C_v \cdot t}{Hd^2} \quad (9)$$

Onde: t = tempo [s]

3.2.6. Porcentagem de Adensamento:

A porcentagem de adensamento U_z é definida como a relação entre o excesso de poropressão dissipado em um instante t e o excesso inicial. U_z

varia entre 0 e 1, no início do processo, a porcentagem de adensamento é 0% e no final, é 100%:

$$U_z = 1 - \frac{\Delta u(t)}{\Delta u_0} \quad (10)$$

Onde: Δu = excesso de poropressão em um tempo t qualquer.

A equação analítica para o processo de adensamento é dada por:

$$U_z = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{A} \cdot (\text{sen} AZ) \cdot e^{-A^2 \tau} \quad (11)$$

$$\text{Onde: } A = \frac{\pi}{2} \cdot (2m + 1) \quad (12)$$

A fórmula acima pode ser representada pelo gráfico abaixo, onde cada uma das curvas (denominadas curvas isócronas, cuja forma irá depender da distribuição inicial de poropressão e das condições de drenagem) representa a solução da equação de adensamento expressa em termos de porcentagem de adensamento e fator de profundidade, para um fator tempo.

Teoricamente, a dissipação total dos excessos de poropressão acontece em um tempo infinito.

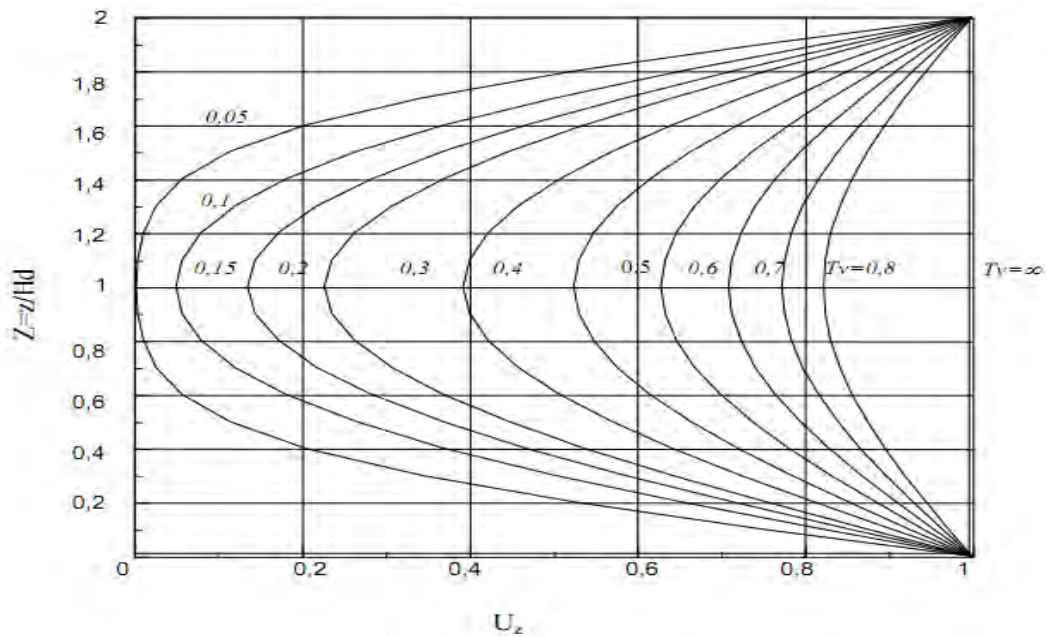


Figura 1- Gráfico grau de adensamento x fator profundidade x fator tempo (fonte: <http://www.eng.uerj.br/~denise/pdf/compressibilidadeadensamento.pdf>)

3.2.7. Curva Recalque x Tempo

A curva recalque x tempo mostra a avaliação da evolução dos recalques com a relação entre a porcentagem média de adensamento associada a aquele tempo:

$$\rho_{tempo} = U_{(t)} \cdot \rho_{total} \quad (13)$$

Onde: ρ_{total} = recalque de adensamento primário

$U_{(t)}$ = porcentagem média de adensamento associada ao tempo desejado.

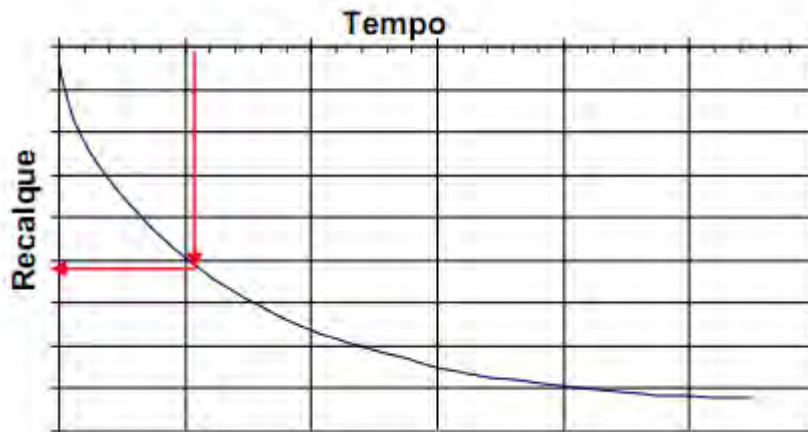


Figura 2 – Curva de adensamento: porcentagem de recalque x fator tempo (Fonte: <http://www.eng.uerj.br/~denise/pdf/compressibilidadeadensamento.pdf>)

3.3. EFEITO DE ARQUEAMENTO

As colunas granulares causam o aumento na estabilidade geral dos aterros executados sobre solos moles, já que a maior parte da carga do aterro é transferida, por efeito de arqueamento para as colunas, ou seja, com uma menor carga atuando sobre o solo mole, há menores recalques ocorrendo nesse solo.

O efeito de arqueamento é aquele onde as cargas geradas pelo aterro sobre o solo, são transferidas em sua maioria para as colunas de material granular, devido à diferença de rigidez existente entre o solo mole e a coluna. Com uma maior capacidade de suporte de carga, as colunas tendem a absorver a maior parte do esforço gerado por esse aterro.

Assim, uma carga aplicada (um aterro) sobre um solo mole uniforme causa uma redistribuição de tensões no mesmo, ou seja, provoca alívio nas regiões mais deformáveis e concentração de tensões nas regiões mais rígidas.

Terzaghi (1943) elaborou um modelo explicativo para exemplificar o efeito do arqueamento no solo. Ele consistia em um recipiente preenchido com solo, no qual a parte do fundo do recipiente é móvel. No instante inicial, quando se aplica uma carga no solo, as cargas no fundo do recipiente são distribuídas de maneira igual, mas a medida que o fundo do recipiente se desloca, a

distribuição de cargas se modifica, ou seja, a carga no fundo do recipiente é menor que no topo. Porém esse conceito depende da rigidez do solo, pois em solos moles serão necessárias grandes deslocamentos aplicadas para que haja essa diferença significativa de tensões na base do recipiente e camadas posteriores de solo. Em solos mais rígidos pequenos deslocamentos na base provocarão reduções nas tensões no fundo do recipiente.

Além da rigidez característica, considera-se também para o efeito de arqueamento, a resistência ao cisalhamento do solo de preenchimento da coluna, pois mesmo um solo apresentando rigidez, ou seja, mesmo se ele possui capacidade de redistribuição de tensões a pequenas deformações, essa areia (ou brita) que fará o preenchimento da coluna precisa apresentar uma resistência ao cisalhamento suficiente para que essas pequenas deformações não levem à plastificação do solo.

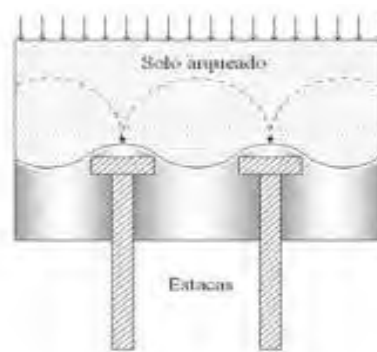


Figura 3 – Exemplo de transferência de carga do aterro para o solo- efeito de arqueamento (Kempfert., 2004) (fonte: [http://repositorio.bce.unb.br/bitstream/10482/3776/1/2006 Sandra%20Patricia%20Echeverria%20Fernandez.pdf](http://repositorio.bce.unb.br/bitstream/10482/3776/1/2006_Sandra%20Patricia%20Echeverria%20Fernandez.pdf))

3.4. ATRITO NEGATIVO

Atrito é definido como a interação entre duas faces de solo quando estão em contato uma com a outra superfície. A resistência provocada devido ao atrito, pode ser analogamente comparada com o modelo de um corpo sobre uma superfície plana horizontal. Para solos, a resistência ao deslizamento, ou resistência ao cisalhamento é definida por: $\tau = \sigma \cdot \tan \varphi$. O ângulo de atrito interno do solo φ , varia de acordo com o tipo de material e o grau de compactação, ou seja, quanto mais denso o solo, maior o ângulo de atrito.

Segundo Velloso, Dirceu & Lopes, Francisco, “o atrito lateral entre solo e estaca ocorre quando há um deslocamento relativo entre o solo e a estaca. Quando a estaca recalca mais do que o solo, manifesta-se o atrito positivo, que contribui para a capacidade de carga da estaca. Quando contrário, o solo recalca mais que a estaca, tem-se o atrito negativo, o que sobrecarrega a estaca.”

Situações onde ocorre o atrito negativo:

- quando uma estaca amolga o solo mole em entorno e, sendo este solo amolgado, ele tende a adensar sob a ação de seu peso próprio, causando atrito negativo;
- quando estacas atravessam uma camada de argila mole onde um aterro já foi depositado anteriormente. A argila em processo de adensamento sofre recalques e causa atrito negativo;
- quando se rebaixa o lençol freático em camada de areia acima de argila mole ou quando há alívio de pressões em camadas de areia abaixo de argilas moles, colocando-se a argila mole em processo de adensamento e causando o atrito negativo.

As colunas granulares encamisadas com geossintéticos, tema de estudo desse trabalho, não sofrem com o efeito de atrito negativo, pois não são materiais incompressíveis como é o caso de estacas de concreto e, além disso não atuam como elementos de fundação e sim, como reforço de solos moles.

3.5. DRENAGEM RADIAL

Segundo a NBR 12.553/03 “Geossintéticos: Terminologia”, drenagem é definida como coleta e condução de um fluido pelo corpo de um geossintético, ou seja, é a transmissão de um fluido de uma determinada cota para outra. No caso de drenagem radial em solos, a água é conduzida através do dreno pois está sob pressão.

Drenagem radial é o padrão de drenagem que escoar radialmente a partir de um ponto topograficamente elevado, como exemplificado na figura a seguir:

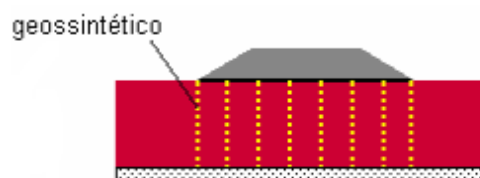


Figura 4 – Padrão de drenagem radial (fonte: www.igs.com.br)

3.6. GEOSSINTÉTICOS

Os geossintéticos são constituídos essencialmente por polímeros e por uma pequena parcela de aditivos. Eles são fabricados em sua maioria a partir de polímeros sintéticos derivados do petróleo, como a poliamida(PA), o policloreto de vinila(PVC), de poliéster(PET), poliestireno expandido(EPS), polietileno(PE), polipropileno(PP), além disso, algumas fibras naturais como o sisal também entram no processo de fabricação.

As principais funções do elemento geossintético são de: controle de erosão superficial, drenagem, filtração, impermeabilização, proteção, reforço (suas propriedades mecânicas melhoram o comportamento mecânico de uma estrutura geotécnica) e separação de camadas de solo.

Os principais tipos de geossintéticos e suas aplicações são definidos pelo Manual Brasileiro de Geossintéticos (Vertematti, José Carlos) como:

- Geobarra: produto com forma de barra e função de reforço;
- Geocélula: produto com estrutura tridimensional aberta , com células interligadas, que confinam o material nela inseridos. Possui função de reforço e controle de erosão;
- Geocomposto: produto formado por mais de um geossintético, geralmente é produzido para desempenhar uma função específica e pode desempenhar as funções de barreira impermeabilizante, drenagem e reforço;
- Geoespaçador: produto com estrutura tridimensional com grande número de vazios cuja função é ser um meio drenante;
- Geoexpandido: fabricado a partir de polímero expandido, com estrutura tridimensional, cuja função é aliviar o peso de estruturas geotécnicas;
- Geofôrma: geossintético cuja finalidade é confinar, conter materiais de modo permanente ou provisório;
- Geogrelha: produto em forma de grelha ("#"), constituído por elementos muito resistentes à tração, cujas aberturas permitem interação com o meio em que estão confinadas e sua principal finalidade é de reforço.
- Geomanta: produto com estrutura tridimensional permeável, cuja função é o controle de erosão do solo.
- Geomembrana: bidimensional de baixa permeabilidade usado para controle de fluxo e separação;
- Geotêxtil: produto têxtil bidimensional permeável, composto de fibras cortadas, filamentos contínuos, monofilamentos, formando estruturas tecidas, não-tecidas, desempenha várias funções como reforço, drenagem, etc;
- Geotubo: produto de forma tubular com função drenante.

3.7. PROPRIEDADES RELEVANTES DOS GEOSSINTÉTICOS

3.7.1. Resistência/deformação/rigidez à tração:

Segundo a NBR 12.824 (Geossintéticos: Determinação da Resistência à Tração Não-confinada – Ensaio de Tração de Faixa Larga), os valores de resistência a tração ($T_{\text{máx}}$ ou T_r) e rigidez à tração (J) desempenhadas pelo geossintético na obra são em função da faixa de deformação ε' e da temperatura ambiente. Assim, quanto maior a taxa de deformação aplicada ε , maior a resistência à tração apresentada (para uma mesma temperatura) e, quanto maior a temperatura ambiente, menor a resistência à tração.

A figura 5 a seguir, demonstra o ensaio de tração em faixa larga (NBR 12.824):

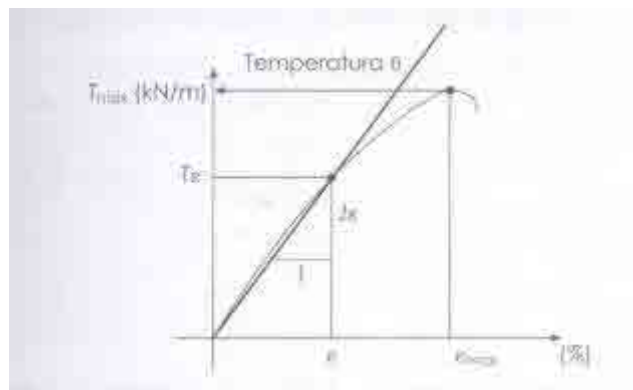


Figura 5- Ensaio de tração em faixa larga (NBR 12.824); (fonte: Manual Brasileiro de Geossintéticos)

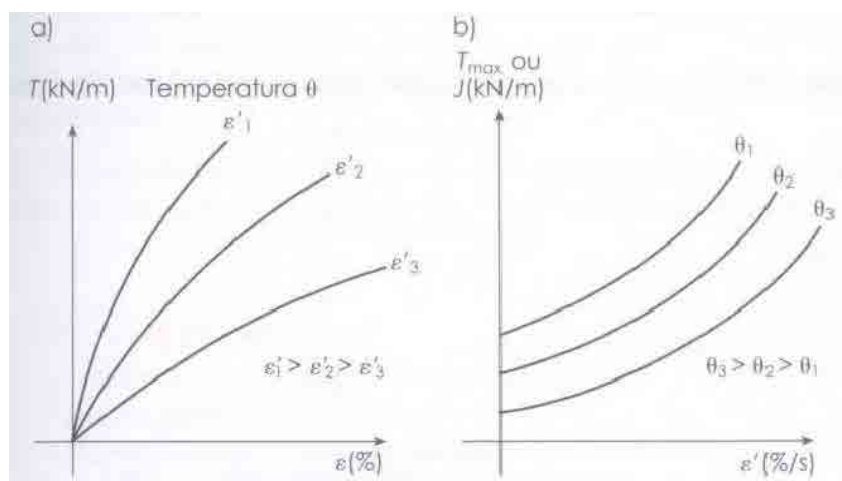


Figura 6- (a) Relação de resistência de tração T e alongação ε ; (b) Relação de resistência à tração T e temperatura θ de um material geossintético; (fonte: Manual Brasileiro de Geossintéticos)

3.7.2. Comportamento em fluência sob tração:

Fluência é a deformação constante e lenta que o geossintético sofre ao longo do tempo, quando este está tracionado. Esta deformação ocorre devido ao rearranjo das moléculas do geossintético quando está submetido à tração. O grau de fluência depende do quanto o material está tracionado, do polímero que é constituído e da temperatura que é submetido.

Assim, quanto maior a tração que este geossintético for submetido (mesmo que essa tração seja inferior a tração máxima $T_{\text{máx}}$), e maior a temperatura, maior será a fluência.

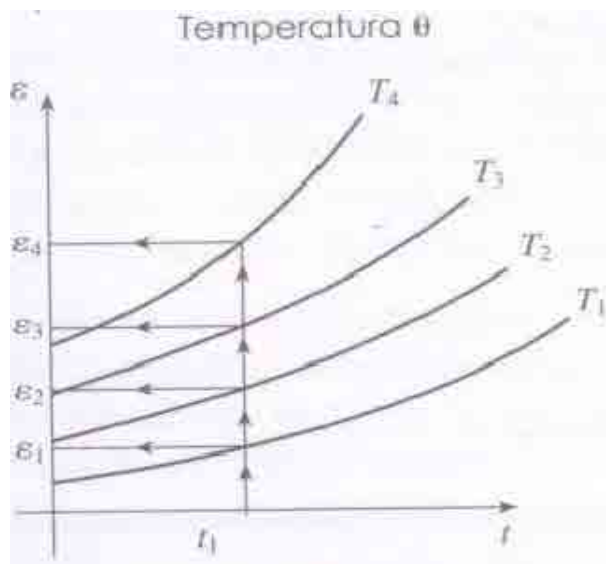


Figura 7 - Curva $\epsilon \times t$ (fluência) : ensaios de fluência para diferentes níveis de carregamento (T), com temperatura fixa. (fonte: Manual Brasileiro de Geossintéticos)

3.7.3. Resistência à esforços de instalação:

Durante a instalação de um geossintético, o material é submetido à diversos tipos de agressão, como esforço de manuseio, instalação, compactação. Assim, quanto mais resistente for o material, melhor será a característica remanescente do geossintético depois da instalação.

3.7.4. Resistência à degradação ambiental:

Amostras exumadas com mais de 20 anos de utilização mostram que geossintéticos possuem degradação ambiental desprezível. Porém, quando submetidos à elementos agressivos ou que possam diminuir suas capacidades mecânicas, eles podem ser produzidos com aditivos, e banhos de polímeros para minimizar essa degradação ambiental.

3.7.5. Interação mecânica com o solo envolvente:

Quanto maior for a interação do geossintético com o solo maior, será o desempenho do reforço, pois a ancoragem e sua resistência à tração serão maiores também.

Existem dois tipos característicos de comportamento de geossintéticos: os contínuos, como os geotêxteis e os descontínuos, como as geogrelhas.

No caso de geossintéticos contínuos como as geotêxteis a adesão com o solo se dá através da seguinte equação:

$$\tau_{sr} = a_{sr} + \sigma \cdot \tan \delta_{sr} \quad (14)$$

Onde:

T_{sr} = a tensão de aderência entre o solo e o reforço;

a_{sr} = adesão entre o solo e o reforço (depende do tipo de geossintético);

σ = tensão normal no plano de reforço;

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

No caso de geossintéticos descontínuos, a aderência se expressa também através da resistência passiva dos elementos transversais da geogrelha. A relação (C_d) entre a resistência de cisalhamento entre a interface do solo-geogrelha com a resistência de cisalhamento do solo é:

$$C_d = \frac{\tau_{sr}}{\tau_s} = \frac{\tan \delta_{sr}}{\tan \varphi} \quad (15)$$

Onde:

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

τ_s = resistência ao cisalhamento do solo;

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

φ = ângulo de atrito do solo.

O coeficiente de interação da relação entre a tensão cisalhante de arrancamento da geogrelha e a resistência de cisalhamento do solo é expresso por:

$$C_i = \frac{\tau_a}{\tau_s} = \frac{T_a}{2.L.\sigma.\tan\phi} \quad (16)$$

Onde:

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

T_a = carga do arrancamento;

L = comprimento de ancoragem;

σ = tensão normal no plano do reforço.

3.7.6. Fatores de redução:

Devido às incertezas dos parâmetros e ou métodos de cálculo adotados para a elaboração de projeto com geossintéticos, majora-se as os esforços atuantes através do fator de segurança global (FS) para se definir qual é o módulo do reforço, ou seja, a resistência à tração requerida pelo geossintético a ser utilizado. Além disso, para o cálculo da resistência à tração admissível em um projeto, utilizam-se fatores de redução para garantir uma maior segurança em relação à tensão máxima ($T_{m\acute{a}x}$) disponível pelo material geossintético.

O fator de redução total é expresso por:

$$FR = f_{cr} \cdot f_{mr} \cdot f_a \cdot f_m \quad (17)$$

Onde:

FR = fator de redução global;

f_{cr} = fator de redução parcial para fluência em tração ($= T_{m\acute{a}x}/T_{ref}$);
 f_{mr} = fator de redução parcial para danos mecânicos de instalação;
 f_a = fator de redução parcial para degradação ambiental (química e biológica);
 f_m = fator de redução parcial para incertezas estatísticas na determinação da resistência do geossintético.

Os valores dos coeficientes “f” são obtidos através de tabelas publicadas em bibliografia técnica, ou de ensaios realizados e fornecidos pelo próprio fabricante ou através de ensaios solicitados pelos próprios compradores do produto.

A resistência à tração (T_a) disponível pelo geossintético é definida como:

$$T_a = \frac{T_{m\acute{a}x}}{FR} \quad (18)$$

Assim, para um projeto com geossintéticos, deve-se sempre considerar que:

$$T_a \geq T_{req}$$

Na prática, determina-se o menor $T_{m\acute{a}x}$ através da seguinte relação:

$$T_{m\acute{a}x} \geq FR \cdot T_{req} \quad (19)$$

3.8. COLUNAS DE MATERIAL GRANULAR ENCAMISADAS COM GEOSSINTÉTICO

As colunas encamisadas com geotêxtil foram idealizadas por Van Impe nos anos 80 e desde meados dos anos 90 vêm sendo utilizadas na Alemanha, onde a tecnologia é mais difundida. No Brasil, os primeiros casos registrados com a utilização de colunas Ringtrac® foram registrados a partir do ano de 2006.

As colunas de material granular encamisadas com geossintéticos, popularmente conhecidas como “Colunas Ringtrac®” são colunas de areia (ou brita) compactadas através de um vibrador acoplado à uma camisa metálica, esta que serve inicialmente como fôrma para a configuração da coluna, moldada in loco e envolvida com o material geotêxtil, de alto módulo de rigidez, baixa fluência e confeccionado sem costura. Elas geralmente são executadas com diâmetro comercial de 0,80m e seus valores de módulo de rigidez (J) mais usuais variam entre 2.000 kN/m e 4.000 kN/m.

As colunas Ringtrac®, são soluções eficientes e alternativas para a melhoria de solos de obras de aterros sobre solos moles a muito moles, onde as colunas de material granular convencionais (como por exemplo, o método de colunas de brita) podem não receber o devido confinamento lateral do solo adjacente, se o solo for muito mole. Assim, as colunas encamisadas evitam o efeito de estrangulamento do fuste das colunas, pois proporcionam devido confinamento lateral ao material de preenchimento. Além disso, atuam como separadores entre o solo mole e o solo granular, agindo drenos devido a permeabilidade do material granular e do tecido geotêxtil, acelerando recalques, processos de dissipação de poropressão e conseqüentemente o tempo de execução da obra, garantindo maior estabilidade geral.

Na execução de aterros sobre as colunas encamisadas com tecidos geotêxteis, utiliza-se usualmente, um elemento geossintético de separação de solo e reforço, uma geogrelha, que além disso, minimiza os efeitos da carga do aterro no solo, equilibrando os recalques e garantindo maior estabilidade global.

A estimativa de tempo de recalque é baseada na metodologia corrente utilizada para tempo de recalques com a utilização de drenos verticais. Por funcionar como um grande dreno, as colunas Ringtrac® diminuem significativamente o tempo de adensamento do solo mole e conseqüentemente, o tempo de execução de recalques, que ocorrem em sua maioria durante a construção do aterro.



Figura 8 - Exemplo de uma coluna Ringtrac® (fonte: www.huesker.com.br)

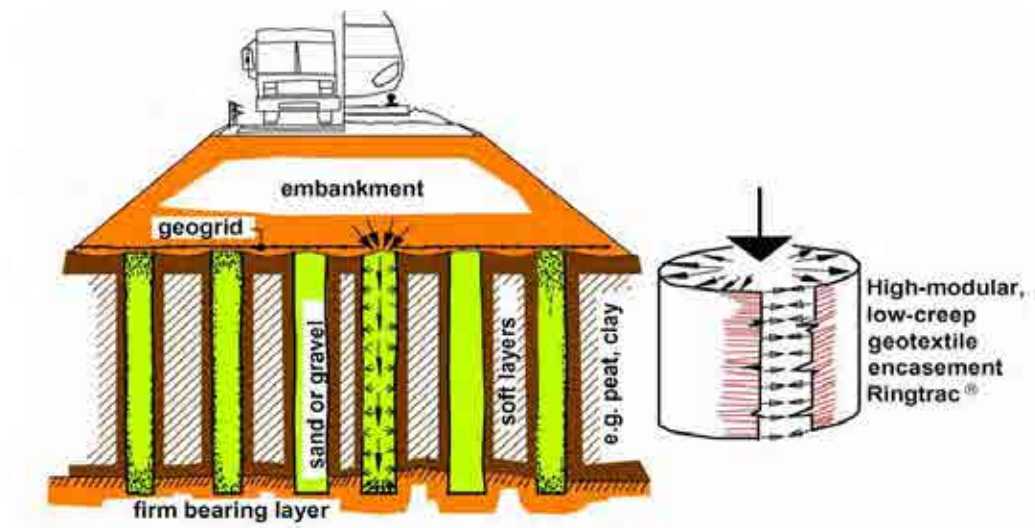


Figura 9 – Esquema de um aterro executado sobre colunas encamisadas com geossintéticos sobre solo mole (Raithel;Kempfert, 2000); (fonte: Almeida, Marcio: Aterro Sobre Solos Moles)

3.9. COMPORTAMENTO GLOBAL DE ATERROS SOBRE COLUNAS GRANULARES

Almeida (1984) e Almeida, Davies & Parry (1985) realizaram estudos onde através da modelagem física de um aterro sem coluna granular e um aterro com coluna granular, constatou-se diferenças de desempenho entre os dois tipos de construção, tais como:

Quanto aos deslocamentos horizontais:

- o aterro com colunas granulares apresenta cerca de metade dos deslocamentos horizontais dos aterros sem colunas granulares. E, além disso, os aterros com colunas granulares atingem maior altura em menor prazo construtivo.

- o aterro construído sem colunas granulares apresenta uma variação de deslocamentos horizontais com a profundidade, mais brusca em comparação com aterros construídos sobre colunas granulares.

Quanto aos deslocamentos verticais, considerando-se as alturas de taludes idênticas:

- os maiores recalques observados na região sob o talude, nos dois casos, podem ser devido à incompleta dissipação das poropressões que se concentram em sua maioria sob a plataforma do aterro.

- o efeito de arqueamento causado pelo recalque do aterro diminui as tensões verticais sob o eixo do aterro e aumenta sob o talude (Parry (1972); Borma, Lacerda e Brügger (1991)). Assim, para que se tenha a dissipação final das poropressões, tem-se que para aterros sobre colunas granulares o recalque máximo ocorre sobre o centro do aterro, já para aterros sem colunas de material granular os recalques máximos ocorrem sob o talude e o centro do aterro (aproximadamente 70% do recalque do talude)

- Portanto, conclui-se que as colunas de areia reduzem os recalques sobre o talude do aterro.

3.10.TECIDO GEOTÊXTIL RINGTRAC®

Ringtrac® é um geocomposto tubular de alta tenacidade de PVA na direção principal (perímetro), confeccionado sem costuras, com alta resistência à degradação química, especificamente desenvolvido para o confinamento e reforço estrutural de colunas de areia ou brita.

Dentre suas principais aplicações estão o reforço de colunas de areia ou brita em sistemas de suporte ou melhoria de subleito em obras de aterros sobre solos moles.

3.10.1. Propriedades do geotêxtil de PVA (Polivinil Álcool)

A tabela 1 a seguir mostra as especificações técnicas gerais dos geocompostos Ringtrac® feito de material PVA e suas principais características:

<u>Propriedades</u>	<u>Ringtrac®</u> <u>100/100</u>	<u>Ringtrac®</u> <u>100/200</u>	<u>Ringtrac®</u> <u>100/300</u>	<u>Ringtrac®</u> <u>100/400</u>
<u>Matéria-prima principal</u>	Filamentos de poliéster na direção perimetral longitudinal			
<u>Resistência à tração (ABNT 12.824)</u>				
Direção longitudinal:	≥ 100kN/m	≥ 100kN/m	≥ 100kN/m	≥ 100kN/m
Direção transversal:	≥ 100kN/m	≥ 200kN/m	≥ 300kN/m	≥ 400kN/m
<u>Módulo de rigidez a 5% de deformação (ABNT 12.824)</u>				
Direção transversal (perimetral):	≥ 650 kN/m	≥ 1.450 kN/m	≥ 1.750 kN/m	≥ 2.150 kN/m
<u>Direção máxima na resistência nominal (ABNT 12.824)</u>				
Direção transversal (perimetral):	≤ 10%	≤ 10%	≤ 10%	≤ 10%
<u>Apresentação, dimensões das bobinas:</u>				
Diâmetro:	Máx: 0,8m	Máx: 0,8m	Máx: 0,8m	Máx: 0,8m
Comprimento (**):	300 m	300 m	300 m	300 m

(*) Materiais Certificados ISO 9001.

(**) Comprimentos especiais são possíveis

Tabela 1 – Especificações técnicas do geocomposto Ringtrac® de PVA

3.10.2. Propriedades do geotêxtil de PET (Polietileno):

<u>Propriedades</u>	<u>Ringtrac®2000 PM</u>	<u>Ringtrac® 3500PM</u>	<u>Ringtrac® 4900PM</u>	<u>Ringtrac® 6500 PM</u>
<u>Matéria-prima principal</u>	Filamentos de PVA na direção perimetral e de PA na longitudinal			
<u>Resistência à tração (ABNT 12.824)</u>				
Direção longitudinal:	≥ 100kN/m	≥ 100kN/m	≥100kN/m	≥ 100kN/m
Direção transversal:	≥ 150kN/m	≥ 200kN/m	≥ 300kN/m	≥ 400kN/m
<u>Módulo de rigidez a 5% de deformação (ABNT 12.824)</u>				
Direção transversal (perimetral):	≥2.000 kN/m	≥3.500 kN/m	≥4.900 kN/m	≥6.500 kN/m
<u>Direção máxima na resitência nominal (ABNT 12.824)</u>				
Direção transversal (perimetral):	≤ 6%	≤ 6%	≤ 6%	≤ 6%
<u>Apresentação, dimensões das bobinas:</u>				
Diâmetro:	Máx: 0,8m	Máx: 0,8m	Máx: 0,8m	Máx: 0,8m
Comprimento (**):	300 m	300 m	300 m	300 m

(*) Materiais Certificados ISO 9001.

(**) Comprimentos especiais são possíveis

Tabela 2 – Especificações técnicas do geocomposto Ringtrac® de PET

3.11. METODOLOGIA EXECUTIVA DE UMA COLUNA ENCAMISADA COM GEOTÊXTIL

A execução de colunas granulares pode ser realizada de duas maneiras: com deslocamento lateral de solo mole e sem deslocamento lateral de solo mole, sendo a primeira a mais utilizada.

3.11.1. Execução com deslocamento lateral de solo mole

O primeiro passo na execução da coluna de material granular Ringtrac® com deslocamento lateral do solo em entorno é a cravação de uma camisa metálica tubular de ponta fechada por válvula em comporta, através de martelo de queda livre, com peso compatível com diâmetro e comprimento da coluna que será executada golpeando em capacete adaptado na cabeça da camisa. A cravação se dará até que a nega (10 golpes iguais de martelo para um determinado comprimento cravado) pré-fixada no início dos serviços, for atingida.

Um funil de boca ajustada ao diâmetro da coluna já previamente preparado com a fixação em sua boca afunilada da peça de geossintético tubular, é acoplado na parte superior da camisa metálica que foi cravada. Uma retro-escavadeira preenche com material granular a peça de Ringtrac® que está dentro da camisa metálica tubular cravada, através do funil.

Após o preenchimento é adaptado na cabeça da camisa metálica tubular um vibrador, que produz a compactação. Simultaneamente ao ser aberta a válvula em comporta na ponta da camisa metálica tubular, esta é içada por cabos de aço acionados pelo guincho do bate-estaca, que em vibração vai sendo gradativamente sacada do solo, desvestindo o Ringtrac®.

A figura a seguir ilustra o método de execução da coluna encamisada com geotêxtil com deslocamento lateral do solo mole:

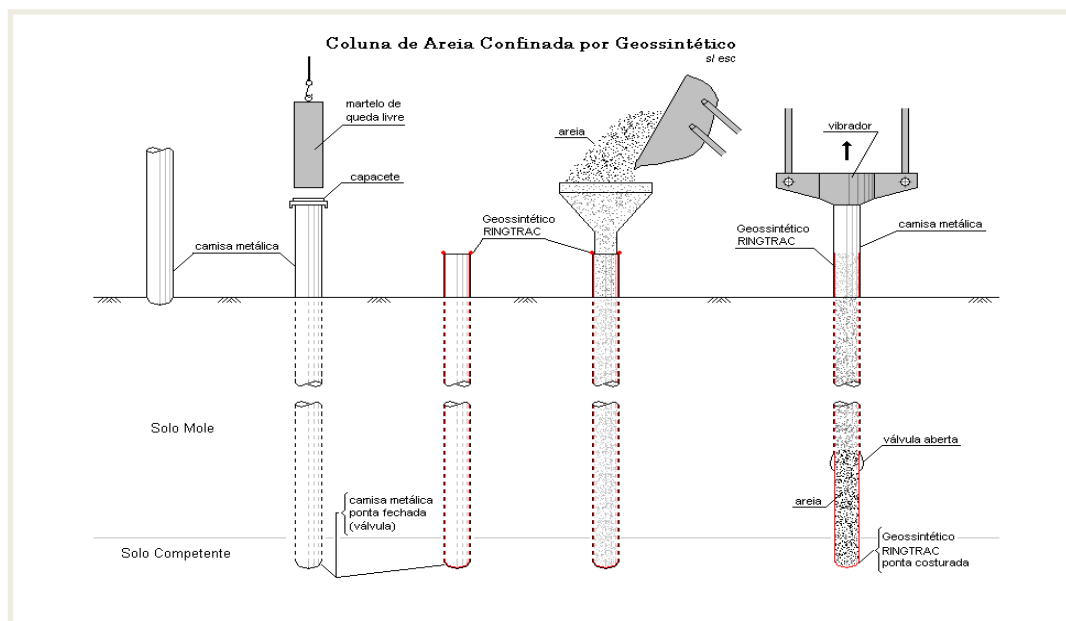


Figura 10 – Execução de colunas encamisadas pelo método de deslocamento (Raithel, Kempfert, 2000); (fonte: catálogos da empresa Huesker)



Figura 11 – Execução de coluna Ringtrac® (fonte: www.huesker.com.br)

3.11.2. Execução sem deslocamento lateral de solo mole:

Este método executivo é realizado quando a resistência do solo em questão for maior, ou seja, quando o solo for mais rijo.

O solo é retirado através de escavação, então a camisa Ringtrac® é inserida e devidamente fixada até a camada de solo mais rija. Um funil de boca ajustada ao diâmetro da coluna já previamente preparado com a fixação em sua boca afunilada da peça de geossintético tubular é acoplado na parte superior da camisa metálica que foi cravada. Uma retro-escavadeira preenche com material granular a peça de Ringtrac® que está dentro da camisa metálica tubular cravada, através do funil.

Após o preenchimento é adaptado na cabeça da camisa metálica tubular um vibrador, que produz a compactação. Simultaneamente ao ser aberta a válvula em comporta na ponta da camisa metálica tubular, esta é içada por cabos de aço acionados pelo guincho do bate-estaca, que em vibração vai sendo gradativamente sacada do solo, desvestindo o Ringtrac®.

3.12. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO:

Interação aterro-coluna-solo mole:

O funcionamento de colunas granulares encamisadas com geossintéticos em solos moles a muito moles, o modo como os recalques se estabilizam, deve-se a uma constante interação entre os elementos em questão.

A carga que o aterro é em sua maioria transferida para as colunas Ringtrac® (pelo efeito de arqueamento), com esse aumento de carga, as colunas recalcam e se expandem lateralmente, aumentando a tração

tangencial na coluna encamisada com geotêxtil e aumentando também a tensão horizontal no solo.

O recalque na coluna provoca uma redistribuição das tensões de arqueamento, o que causa um aumento nas tensões verticais sobre o solo mole. Com o aumento das tensões verticais e horizontais sobre o solo mole, este se adensa, aumentando sua rigidez e novamente, redistribuindo as cargas do efeito de arqueamento. Além disso, o adensamento do solo é também acelerado pelo efeito de dreno vertical que as colunas encamisadas causam no mesmo. A diferença de pressão entre a coluna e o solo mole faz com que a poropressão seja mais rapidamente dissipada do solo mole.

Com uma nova redistribuição de tensões pelo efeito de arqueamento do solo, a coluna é novamente carregada. Esse processo se procede sucessivamente até que os recalques e deformações do solo são estabilizadas e a distribuição de tensões entre os dois tende a se estabilizar.

3.13. MÉTODOS DE CÁLCULO PARA DIMENSIONAMENTO DA COLUNA

Muitos métodos de cálculo para colunas encamisadas com geossintéticos vêm sido desenvolvidos ao longo dos anos. Os primeiros métodos foram desenvolvidos por Van Impe (1989).

Os métodos de cálculo mais usuais aplicados para o cálculo de colunas encamisadas com geossintéticos foram desenvolvidos por Raithel (1999) e Raithel & Kempfert (2000), um resultado de décadas de pesquisa, testes e estudos que levaram ao desenvolvimento dessas técnicas de cálculo muito mais efetivas e de grande aplicabilidade.

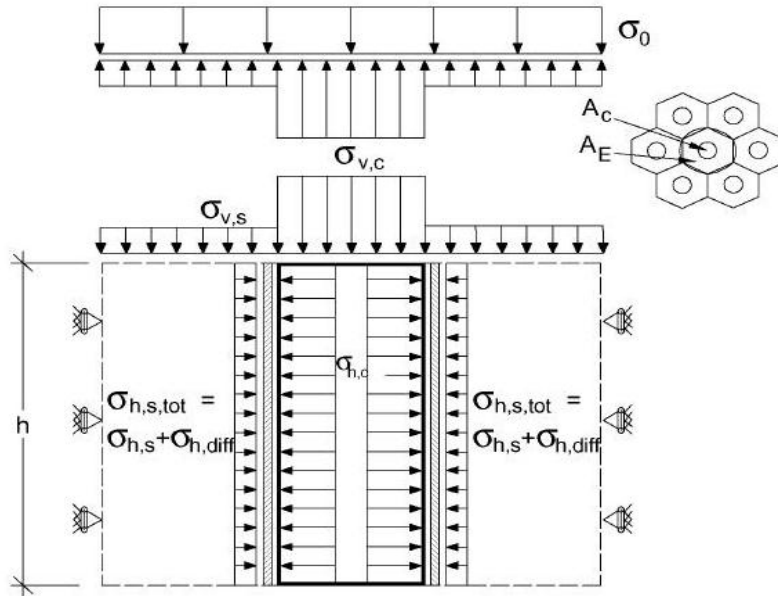


Figura 12 – Modelo de cálculo com as tensões com as tensões atuantes na coluna (Raithel, Kempfert, 2000)

O método de Raithel(1999) e Ratheil e Kempfert (2000) faz as seguintes considerações para o cálculo das colunas:

- que a coluna se assente em uma camada subjacente indeformável;
- recalques iguais na coluna e no solo no entorno;
- condição de empuxo ativo K_{ac} na coluna;
- para o método de escavação, utiliza-se a condição $K_{os} = 1 - \sin \varphi'$ para o solo no entorno da coluna granular, sendo φ' o ângulo de atrito interno efetivo do solo;
- para o método de deslocamento lateral, utiliza-se a condição K_{os}^* , que é o K_o majorado, para o método de escavação utiliza-se o K_{os} majorado também;
- o geotêxtil possui comportamento linear elástico;
- volume da coluna é constante;
- os cálculos serão feitos para a condição drenada, utilizando-se os parâmetros efetivos, pois esta condição é a de maiores recalques;
- o solo possui comportamento linear-elástico crescente com a profundidade;

O módulo de rigidez J possui um comportamento elástico linear e a deformação máxima que o elemento geossintético pode sofrer é de 8% para geotêxteis de PET e 4% para geotêxteis de PVA.

O acréscimo de força no geossintético é definido como:

$$F_R = J \times \frac{\Delta r_c}{r_{geo}} \quad (20)$$

Onde:

ΔF_R = acréscimo de força no geossintético;

J = módulo de rigidez do geossintético;

Δr_{geo} = variação do raio do geossintético;

r_{geo} = raio do geossintético (comercialmente utilizado o diâmetro de 0,8m para as obras no Brasil).

A compatibilidade de deformações horizontais relaciona o valor da variação do raio da coluna (Δr_c) com a variação do raio do geossintético (Δr_{geo}):

$$(\Delta r_c) = (\Delta r_{geo}) + (r_{geo} + r_c) \quad (21)$$

Onde: r_c = raio da coluna

A variação do raio da coluna (Δr_c) é calculada segundo a abordagem proposta por Ghionna e Jamiolkowski (1981), como função da diferença de tensões horizontais: $\Delta \sigma_{hdif} = \Delta \sigma_c - (\Delta \sigma_{hs} + \Delta \sigma_{geo})$, que resulta na parcial mobilização do empuxo passivo no solo do entorno:

$$\Delta r_c = \frac{\Delta \sigma_{hdif}}{E^*} \cdot \left(\frac{1}{a_c} - 1 \right) \cdot r_c \quad (22)$$

Onde:

$\Delta \sigma_{hdif}$ = diferença de tensões horizontais (entre a coluna e solo mais geossintético);

E^* = módulo de elasticidade ou módulo de Young da coluna;

a_c = área da coluna granular normalizada, ou seja, A_c/A : área das colunas dividido pela área total;

r_c = raio da coluna.

$\Delta\sigma_{hc}$ = variação de tensão horizontal atuando na coluna granular;

$\Delta\sigma_{hs}$ = variação da tensão horizontal atuando no solo em torno da coluna granular;

$\Delta\sigma_{geo}$ = variação da tensão horizontal do geossintético;

A estimativa dos valores do raio da coluna (Δr_c) possibilita os cálculos das forças atuantes no topo da coluna encamisada e o cálculo dos recalques que ocorrerão no sistema, gerados pelo acréscimo de tensões $\Delta\sigma_0$ da construção do aterro em questão.

Os cálculos de deformação horizontal da coluna (Δr_c) e o recalque do solo S_s (sendo admitido para os efeitos de cálculo que o recalque da coluna é igual ao recalque do solo) são realizados através do método proposto por Ghionna e Jamiolkowsky (1981). Neste processo iterativo (aplica-se de uma função repetidamente, utilizando a saída de uma iteração como entrada para a próxima) deve-se determinar o valor de $\Delta\sigma_{vs}$ e em seguida determina-se os valores de variação do raio da coluna .

$$\left\{ \frac{\Delta\sigma_{vs}}{E_{os}ds} - \frac{2}{E^*} \cdot \frac{v_s}{1-v_s} \left[K_{ac} \cdot \left(\frac{1}{a_c} \cdot \Delta\sigma_0 - \frac{1-a_c}{a_c} \cdot \Delta\sigma_{vs} + \sigma_{v0c} \right) - K_{os} \cdot \Delta\sigma_{vs} - K_{os}^* \cdot \sigma_{vos} + \frac{(r_{geo}-r_c) \cdot J}{r_{geo}^2} - \frac{\Delta r_c \cdot J}{r_{geo}^2} \right] \right\} \cdot h_c = \left[1 - \frac{r_c^2}{(r_c + \Delta r_c)^2} \right] \cdot h_c \quad (23)$$

E, a deformação horizontal da coluna é dada por:

$$\Delta r_c = \frac{K_{ac} \cdot \left(\frac{1}{a_c} \cdot \Delta\sigma_0 - \frac{1-a_c}{a_c} \cdot \Delta\sigma_{vs} + \sigma_{v0c} \right) - K_{os} \cdot \Delta\sigma_{vs} - K_{os}^* \cdot \sigma_{vos} + \frac{(r_{geo}-r_c) \cdot J}{r_{geo}^2}}{\frac{E^*}{\left(\frac{1}{a_c} - 1 \right) \cdot r_c} + \frac{J}{r_{geo}^2}} \quad (24)$$

Onde:

$a_c = A_c/A$ (razão de áreas);

$\Delta\sigma_0$ = acréscimo de tensão vertical (aterro sobre colunas);

σ_{v0c} = tensão vertical inicial (sem a sobrecarga) do solo sobre a coluna;

σ_{v0s} = tensão vertical inicial (sem a sobrecarga) do solo em entorno;

K_{ac} = coeficiente de empuxo ativo gerado pelo material.

Módulo de Elasticidade:

O valor de E^* do módulo de elasticidade da coluna é definido como:

$$E^* = \left(\frac{1}{1 - \nu_s} + \frac{1}{1 + \nu_s} \cdot \frac{1}{a_c} \right) \cdot \frac{(1 + \nu_s) \cdot (1 - 2\nu_s)}{(1 - \nu_s)} \cdot E_{oeds}$$

(25)

Onde:

ν_s = coeficiente de Poisson do solo;

E_{oeds} = módulo oedométrico do solo.

Recalque:

O recalque da coluna e do solo é expresso por:

$$\Delta h_s = \Delta h_c = \left(1 - \frac{r_c^2}{(r_c + \Delta r_c)^2} \cdot h_c \right) \quad (26)$$

Onde:

h_c = altura da coluna;

Δh_s = recalque solo;

Δh_c = recalque coluna;

r_c = raio inicial da coluna.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. PROGRAMA RINGTRAC®

O programa Ringtrac® (Estimativa de Colunas Encamisadas com Geossintéticos de acordo com as metodologias analíticas propostas por Raithel (1999), Raithel Kempfert (2000) e baseadas em Gionna e Jamiolkowski (1981)), desenvolvido pela empresa Huesker GmbH, tem por objetivo o auxílio no cálculo e estimativa das tensões atuantes no topo da coluna encamisada com geossintético Ringtrac® e as tensões atuantes no solo, além disso o programa prevê a estimativa do recalque que ocorrerá na obra, as condições de deformação do geossintético nos estados limites último, estados limite de serviço e o cálculo de espaçamento de colunas (de acordo com a porcentagem de colunas fornecida pelo projetista) .

Os fatores geotécnicos que são utilizados no programa Ringtrac® são:

- porcentagem de colunas na área total da obra (a_c , como citado anteriormente no item: métodos de cálculo);
- raio da coluna;
- espessura do solo mole;
- carga permanente e carga temporária que atuam sobre o aterro e o solo;
- ângulo de atrito efetivo;
- coesão efetiva;
- peso específico submerso do solo;
- coeficiente de Poisson do solo;
- Módulo Oedométrico do solo mole;
- tipo de material de preenchimento da coluna, como por exemplo areia, brita, etc;
- ângulo de atrito do material de preenchimento da coluna;
- peso específico do material da coluna submerso;

-tipo do geotêxtil Ringtrac® (por exemplo: J6500 PM de PVA ou 100/200 de PET);

-fatores de segurança adotados para cargas permanentes, cargas de tráfego, etc.

-se o método executivo a ser usado for o de deslocamento lateral do solo mole, adota-se o valor “1,0” para o coeficiente de aumento da tensão efetiva do solo.

A figura 13 a seguir ilustra um exemplo hipotético, dos dados iniciais a serem preenchidos no software Ringtrac®, para análise dos recalques e tensões atuantes nos estados limites de serviço e estado limite último.

input data:

geometry:

percentage of columns [-] (recommendation: at least 0.10)

radius of the columns [m]

thickness of the soft soil layer [m]

soft soil parameters:

effective angle of internal friction [°]

effective cohesion [kN/m²]

unit weight (submerged unit weight) [kN/m³]

Poisson ratio [-]

oedometric modulus at the reference stress [kN/m²]

reference stress [kN/m²]

For DISPLACEMENT method of construction click the box and enter a value for the increased coefficient of earth pressure at rest (usual value 1.0) ☒ [-]

surcharge:

traffic load (temporay overburden) [kN/m²]

embankment dead load [kN/m²]

load increments [kN/m²]

Ringtrac properties:

Please choose Ringtrac type and period under consideration

installation radius of Ringtrac [m]

columns fill parameters:

type of fill material

angle of internal friction [°]

unit weight (submerged unit weight) [kN/m³]

partial factors of safety:

	ultimate limit state	serviceability limit state
partial factor of safety to be applied on dead loads:	1,3 [-]	1,00 [-]
partial factor of safety to be applied on traffic loads:	1,3 [-]	1,00 [-]
partial factor of safety to be applied on flexible reinforcement:	1,1 [-]	

RUN CALCULATION OF THE REQUIRED RING TENSILE STRENGTH (Ultimate Limit State)

RUN SETTLEMENT CALCULATION (Serviceability Limit State)

Quit

Figura 13 – Exemplo de dimensionamento no programa Ringtrac®, com os parâmetros a serem considerados no cálculo dos recalques e tensões atuantes nos estados limites

Os parâmetros considerados para o exemplo acima foram:

- porcentagem de colunas na área total da obra: 15%;
- raio da coluna: 0,4m;
- espessura do solo mole: 15m;
- carga permanente que atua sobre o aterro: 150 kN/m²;
- carga móvel que atua sobre o aterro: 30 kN/m²;
- ângulo de atrito efetivo do solo mole: 20°;
- coesão efetiva: 15 kN/m²;
- peso específico submerso do solo mole: 5 kN/m³;
- coeficiente de Poisson do solo: 0,4;
- Módulo Oedométrico do solo mole: 600 kN/m²;
- tipo de material de preenchimento da coluna: areia;
- ângulo de atrito do material de preenchimento da coluna: 32,5°;
- peso específico do material da coluna submerso: 10 kN/m³;
- tipo do geotêxtil Ringtrac®: 100/300 (para 120 anos);
- método executivo a ser usado: de deslocamento lateral do solo mole.

Os fatores de segurança adotados usualmente por projetistas para o programa Ringtrac®, seguindo critérios baseados em experiências práticas e também de programas de análise de estabilidade são:

Fator de segurança para carga permanente: 1,3 (para Estado Limite Último) e 1,1 (para Estado Limite de Serviço) ;

Fator de segurança para carga de tráfego: 1,3 (para Estado Limite Último) e 1,1 (para Estado Limite de Serviço);

Fator de segurança para reforço carga móvel: 1,1 (para Estado Limite Último).

Para os dados de projeto utilizados acima, o resultado de cálculo para estado limite último é dado conforme Figura 14:

Results ULS		
number of analysed slices	30	[-]
axial spacing in a triangular pattern	1,97	[m]
pressure on top of the columns at maximum surcharge	1221,81	[kN/m²]
pressure on top of the soft soil at maximum surcharge	59,68	[kN/m²]
load on column top at maximum surcharge	614,15	[kN]
ring tensile stiffness of Ringtrac	1750	[kN/m]
maximum ring strain in Ringtrac	0,071	[-] (should not exceed 0,08 resp. 8% for PET types and 0,04 resp. 4% for PVA types)
mobilized ring force	125,1	[kN/m] (may not exceed the available design strength in ring direction cited below)
ultimate ring tensile strength of Ringtrac	300	[kN/m]
reduction factor due to creep	1,52	[-]
reduction factor due to installation damage	1,2	[-]
reduction factor due to seams and joints	1,00	[-] (Ringtrac is seamless)
reduction factor due to environmental effects	1,03	[-]
partial factor of safety to be applied to flexible reinforcement	1,1	[-]
available design strength in ring direction	145,2	[kN/m]

Figura 14 – Resultado de análise para estado limite última no programa Ringtrac®

Na figura 14, são apresentados valores de pressões no topo da coluna nas condições de estado limite último. Para as cargas de aterro permanente e móvel aplicadas, e para esse tipo de geossintético (100/300), com todos os parâmetros de solo utilizados, a deformação máxima no geossintético será de 7% e a máxima carga mobilizada pelo Ringtrac® será de 125 kN. Para geossintéticos de PET, o valor da deformação máxima que este material pode sofrer, não pode ultrapassar 8% e a máxima carga de mobilização disponível será de 145,2 kN. Portanto, para o exemplo de análise considerado, este tecido geotêxtil poderá ser utilizado em um projeto, sem exceder os limites de deformação.

O resultado de cálculo para a análise de estado de serviço é dado pela Figura 15, abaixo:

Results SLS		
number of analysed slices	30	[-]
axial spacing in a triangular pattern	1,97	[m]
pressure on top of the columns at maximum surcharge	952,42	[kN/m ²]
pressure on top of the soft soil at maximum surcharge	43,69	[kN/m ²]
load on column top at maximum surcharge	478,74	[kN]
total settlement	1,26	[m]
ring tensile stiffness of Ringtrac	1750	[kN/m]
maximum ring strain in Ringtrac	0,056	[-]

Figura 15 – Resultado da análise para estado limite de serviço no programa Ringtrac®

A análise de estado de serviço fornece os valores da carga aplicada no topo da coluna, em kN/m², a carga suportada pelo solo mole, também em kN/m², e o total de recalques previstos para a obra, que neste exemplo é de aproximadamente 1,26 m.

4.2. ANÁLISES PARAMÉTRICAS COM O USO DO SOFTWARE RINGTRAC®

As análises paramétricas realizadas neste estudo visam verificar o comportamento de um sistema de melhoria de solo, com o uso de colunas granulares encamisadas com o tecido geotêxtil Ringtrac®, para diferentes parâmetros de solo, e diferentes módulos de rigidez do geotêxtil Ringtrac® através do software Ringtrac®.

Através dessas análises realizadas no software, obteve-se valores de recalque, em metros, e tensão efetiva no topo da coluna, e a tensão efetiva no

solo mole, expressas em kN/m^2 . Com esses resultados, é feita uma comparação entre os resultados obtidos, obtendo-se o comportamento dos diferentes tipos de solo, para cada tipo de geotêxtil.

Os parâmetros variados na análise foram:

- Porcentagem de colunas na área total da obra: 10%, 15% e 20%;
- Espessura do solo mole: 10m, 13m e 16m;
- Altura do aterro: 2m, 4m e 6m;
- Módulo Edométrico: 500 kN/m^2 , 1000 kN/m^2 e 1500 kN/m^2 ;
- Ângulo de atrito do solo mole: 20° , 22° e 24° ;
- Módulo de rigidez do geotêxtil Ringtrac® (foram utilizados para a análise geotêxteis de PVA): 2000 PM, 3500 PM e 4900 PM.

Para todas as análises, foram considerados constantes os seguintes parâmetros:

- Módulo de Poisson: 0,33;
- Raio da coluna: 0,4 m
- Carga móvel: 30 kN/m^2 ;
- Coesão do solo mole: 5 kN/m^2 ;
- Execução com deslocamento lateral do solo mole (Displacement Method);
- Material de preenchimento das colunas: areia;
- Ângulo de atrito da areia (material de preenchimento da coluna): 30° ;
- Fatores de segurança: 1,3;
- Peso específico da areia(material de preenchimento da coluna): 20 kN/m^3 .

Assim, mantendo-se fixos esses parâmetros acima citados e, variando-se a cada análise, apenas um parâmetro dentre os citados, foram feitas no total, 726 diferentes análises no programa Ringtrac®.

Dos 726 resultados encontrados, foram considerados como resultados válidos, aqueles cuja deformação máxima de ruptura na direção radial do material geotêxtil foi menor ou igual a 4%, pois é a deformação máxima adotada pelo programa para que este material não comprometa suas propriedades.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES DAS ANÁLISES PARAMÉTRICAS

Os resultados das análises feitas no programa Ringtrac® são apresentados através de gráficos de recalque versus módulo de rigidez do geossintético e recalque versus tensão no topo da coluna, verificando-se através destes, o comportamento dos parâmetros de solo escolhidos para o estudo: Módulo Oedométrico e ângulo de atrito do solo mole.

5.1. Módulo Oedométrico

Para valores constantes de ângulo de atrito do solo mole, e altura de aterro, os resultados obtidos para essas situações com diferentes valores de Módulo Oedométrico (também conhecido como Módulo de Confinamento) são descritos abaixo.

5.1.1. Gráficos : Tensão na Coluna vs Módulo de Rigidez do geotêxtil

Ringtrac®:

Nos gráficos apresentados abaixo, os valores de tensão efetiva na coluna Ringtrac® para um dado Módulo de Rigidez do material, são iguais para as diferentes espessuras de solo mole, pois a espessura do solo mole interferirá somente nos valores de recalques totais ocorridos no solo.

Altura de aterro = 2m:

Gráfico 1: Módulo de Rigidez do Ringtrac® vs Tensão no Topo da Coluna para $E_{oed} = 500 \text{ kN/m}^2$

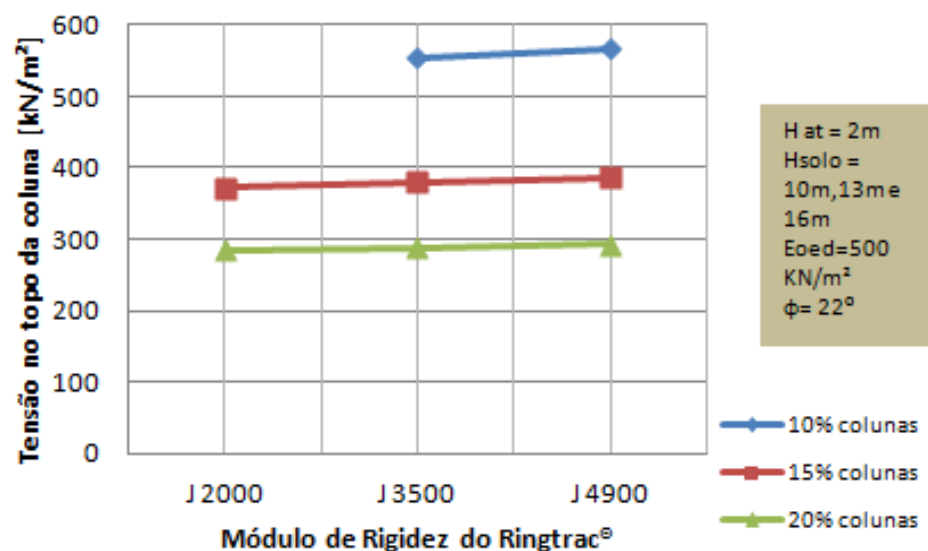


Gráfico 2: Módulo de Rigidez do Ringtrac® vs Tensão no Topo da Coluna para $E_{oed} = 1000 \text{ kN/m}^2$:

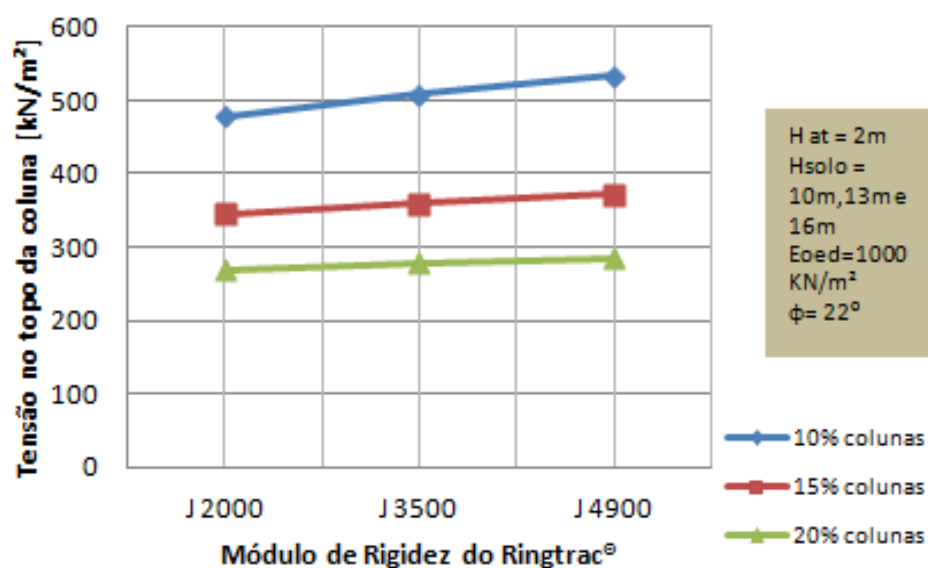
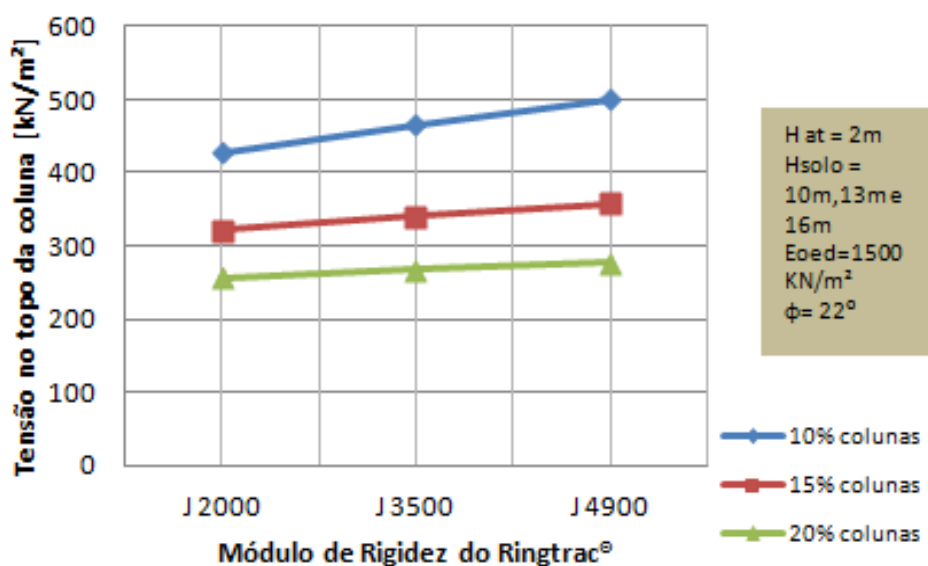


Gráfico 3: Módulo de Rigidez do Ringtrac® vs Tensão no Topo da Coluna para $E_{oed} = 1500 \text{ kN/m}^2$:



Para uma altura de aterro de 2m, com o peso específico do material da coluna sendo 19 kN/m^3 , o que equivale à uma carga de 38 kN/m^2 no solo, observou-se que:

- O aumento do Módulo Oedométrico em casos onde há 10% de colunas Ringtrac® na área total da obra, diminui em até 14% o total da carga aplicada na coluna pelo efeito de arqueamento do solo, em comparação com outro solo de E_{oed} menor.
- Para casos onde há 15% de colunas na área total da obra, a minoração das cargas na coluna representa aproximadamente 16% quanto maior o E_{oed} do solo mole.
- E para casos onde há 20% de colunas no total da área estudada, a minoração das cargas na coluna, com o aumento do Módulo Oedométrico representa 12%.
- Observa-se também que o aumento do Módulo de Rigidez do geossintético (de J 2000 para J 3500, para J 4900) pode significar um ganho de até 17% a mais de carga que será transferida à coluna, ao invés de ser transferida ao solo.

Altura de aterro = 4m

Par um altura de aterro de 4m, as variações de tensões efetivas na coluna com diferentes módulos de rigidez do geotêxtil são expressas por:

Gráfico 4: Módulo de Rigidez do Ringtrac® vs Tensão no Topo da Coluna para $E_{oed} = 500 \text{ kN/m}^2$:

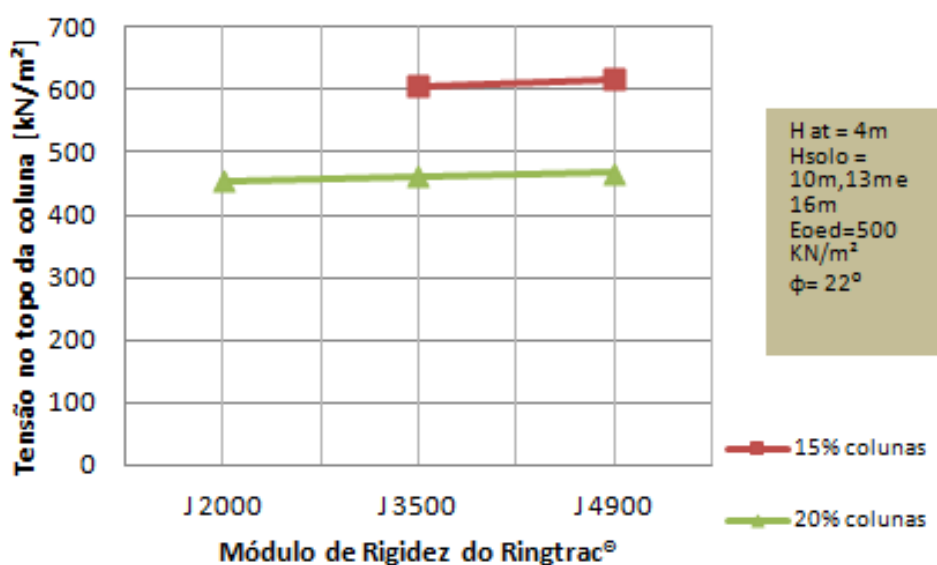


Gráfico 5: Módulo de Rigidez do Ringtrac® vs Tensão no Topo da Coluna para $E_{oed} = 1000 \text{ kN/m}^2$:

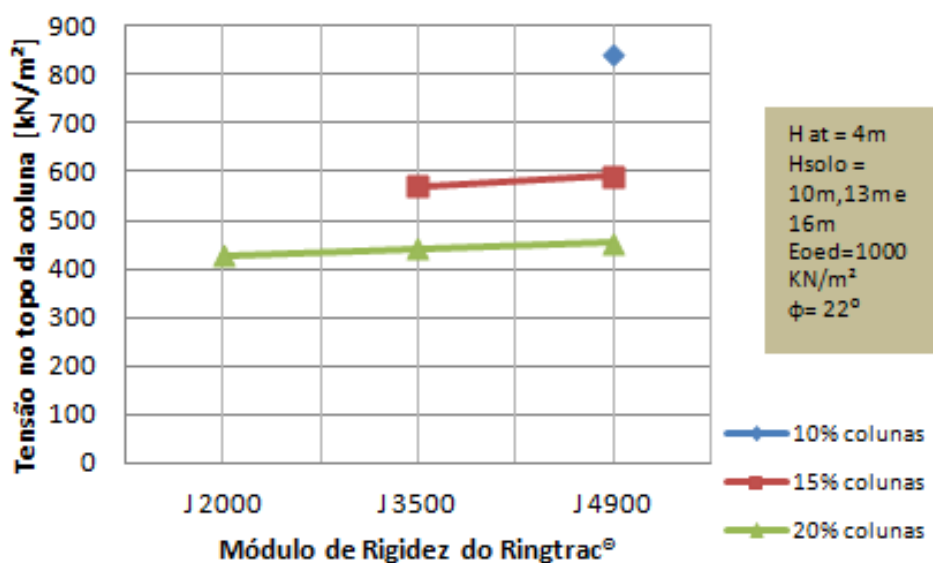
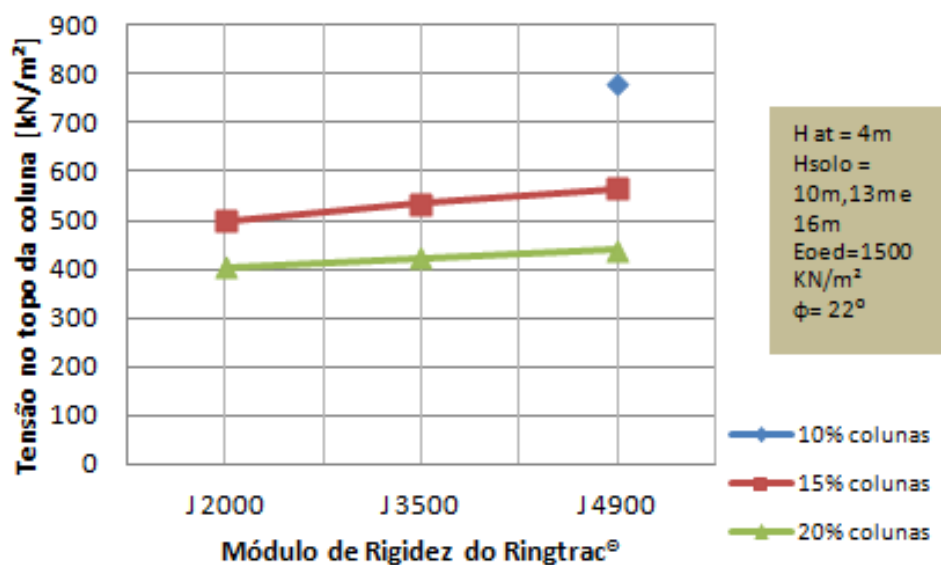


Gráfico 6: Módulo de Rigidez do Ringtrac® vs Tensão no Topo da Coluna para $E_{oed} = 1500 \text{ kN/m}^2$:



Para um altura de aterro de 4m, com o peso específico do material de aterro sendo 19 kN/m^3 , o que equivale à uma carga permanente de 76 kN/m^2 no solo, observou-se que:

- O aumento do Módulo Oedométrico em casos onde há 10% de colunas Ringtrac® na área total da obra, diminui em até 12% o total da carga aplicada na coluna pelo efeito de arqueamento do solo, em comparação com outro solo de E_{oed} menor.
- Para casos onde há 15% de colunas na área total da obra, a minoração das cargas na coluna representa aproximadamente 12% quanto maior o E_{oed} do solo mole.
- E para casos onde há 20% de colunas no total da área estudada, a minoração das cargas na coluna, com o aumento do Módulo Oedométrico também é de aproximadamente 12%.
- Observa-se também que o aumento do Módulo de Rigidez do geossintético (de J 2000 para J 3500, para J 4900) pode significar um ganho de até 13% a mais de carga que será transferida à coluna, ao invés de ser transferida ao solo.

Altura de aterro = 6m

Gráfico 7: Módulo de Rigidez do Ringtrac® vs Tensão no Topo da Coluna para $E_{oed} = 500 \text{ kN/m}^2$:

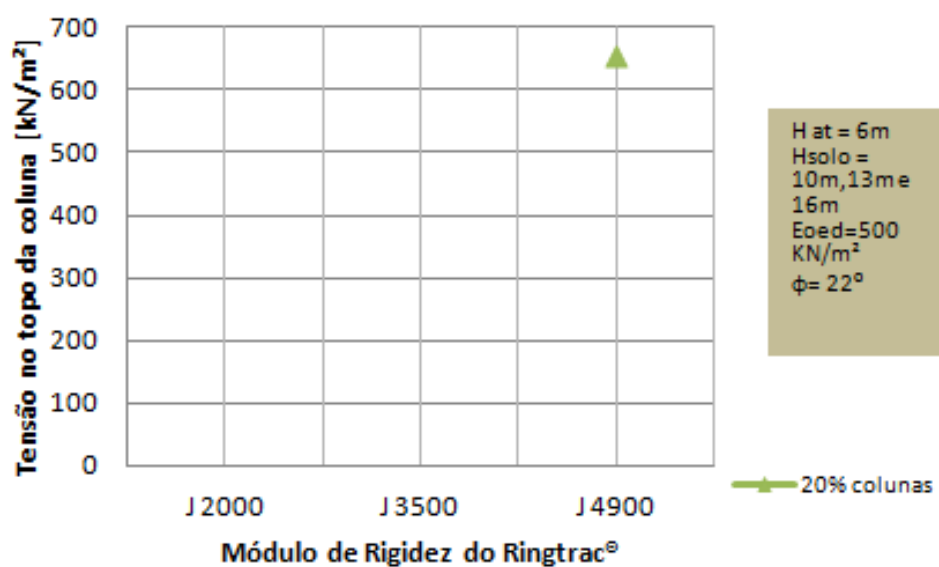


Gráfico 8: Módulo de Rigidez do Ringtrac® vs Tensão no Topo da Coluna para $E_{oed} = 1000 \text{ kN/m}^2$:

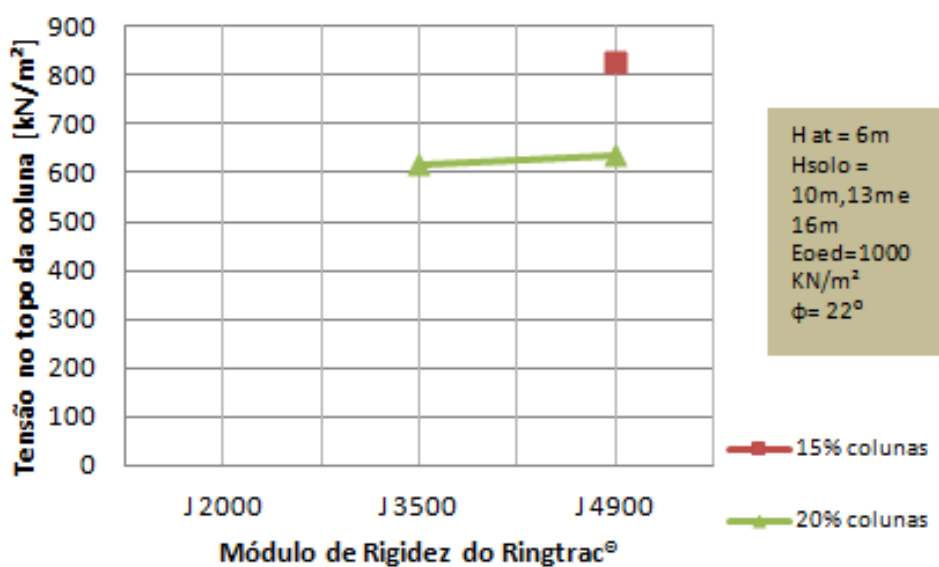
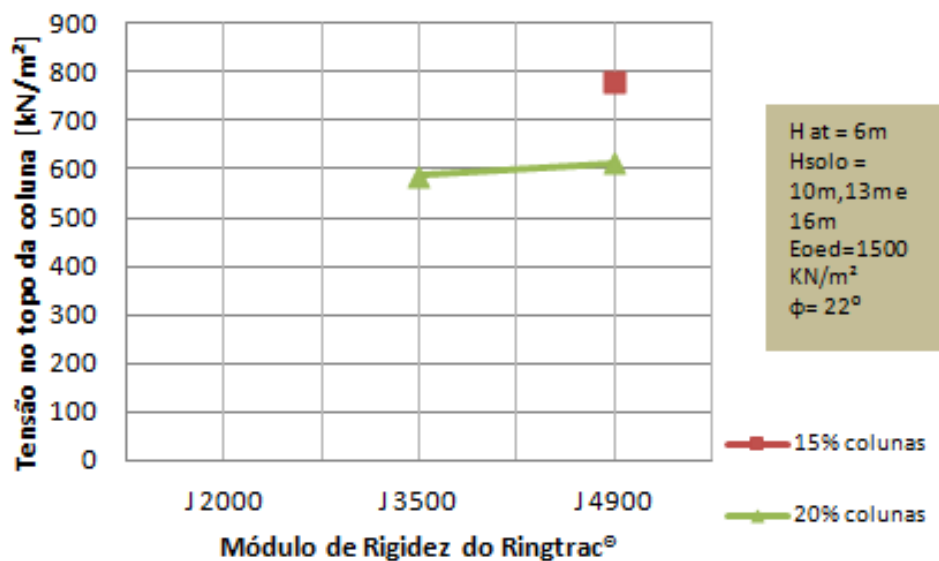


Gráfico 9: Módulo de Rigidez do Ringtrac® vs Tensão no Topo da Coluna para $E_{oed} = 1500 \text{ kN/m}^2$:



Para um altura de aterro de 6m, com o peso específico do material de aterro sendo 19 kN/m^3 , o que equivale à uma carga permanente de aproximadamente 114 kN/m^2 no solo, observou-se que:

- Para casos onde a porcentagem de colunas no solo é 10%, a deformação do geotêxtil para essa carga aplicada, ultrapassa o valor de 4%, que é o máximo permitido para geotêxteis de PVA. Portanto, não é aplicável usar-se esta porcentagem em um caso de obra.
- Para casos onde há 15% de colunas na área total da obra, a minoração das cargas na coluna representa aproximadamente 6% quanto maior o E_{oed} do solo mole.
- E para casos onde há 20% de colunas no total da área estudada, a minoração das cargas na coluna, com o aumento do Módulo Oedométrico também é de aproximadamente 6,5%.
- Observa-se também que o aumento do Módulo de Rigidez do geossintético (de J 2000 para J 3500, para J 4900) pode significar um ganho de até 5% a mais de carga que será transferida à coluna, ao invés de ser transferida ao solo.

Portanto, para as três diferentes alturas de aterro, conclui-se que o aumento do Módulo Oedométrico do solo onde serão instaladas as colunas produz resultados efetivos de melhoria do solo, quanto menor for a altura do aterro.

5.1.2. Gráficos de Recalque vs Módulo de Rigidez do geotêxtil Ringtrac®:

Os recalques obtidos no estudo, para diferentes situações, são apresentados abaixo:

Altura de aterro = 2m

Gráfico 10: Módulo de Rigidez do Ringtrac® vs Recalque para $E_{oed} = 500 \text{ kN/m}^2$

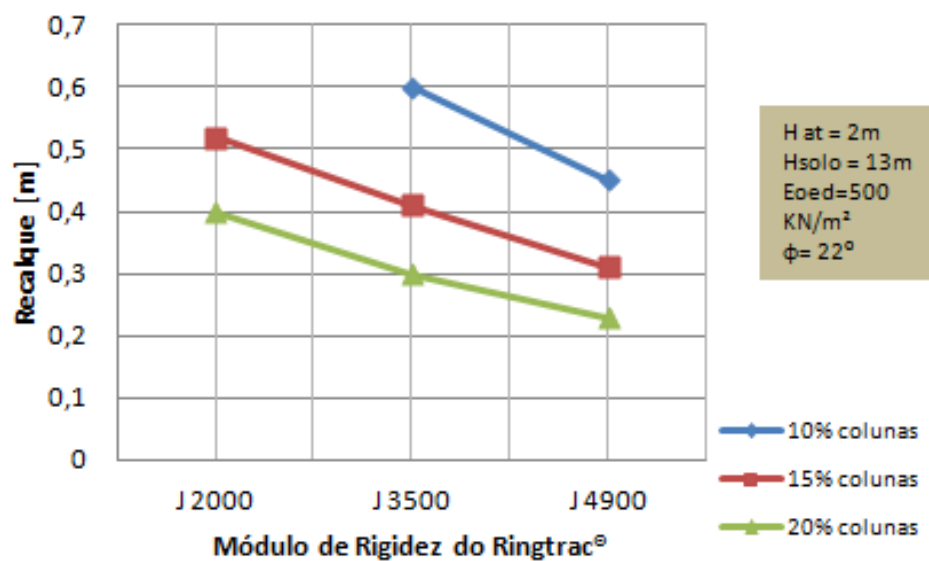


Gráfico 11: Módulo de Rigidez do Ringtrac® vs Recalque para $E_{oed} = 1000 \text{ kN/m}^2$

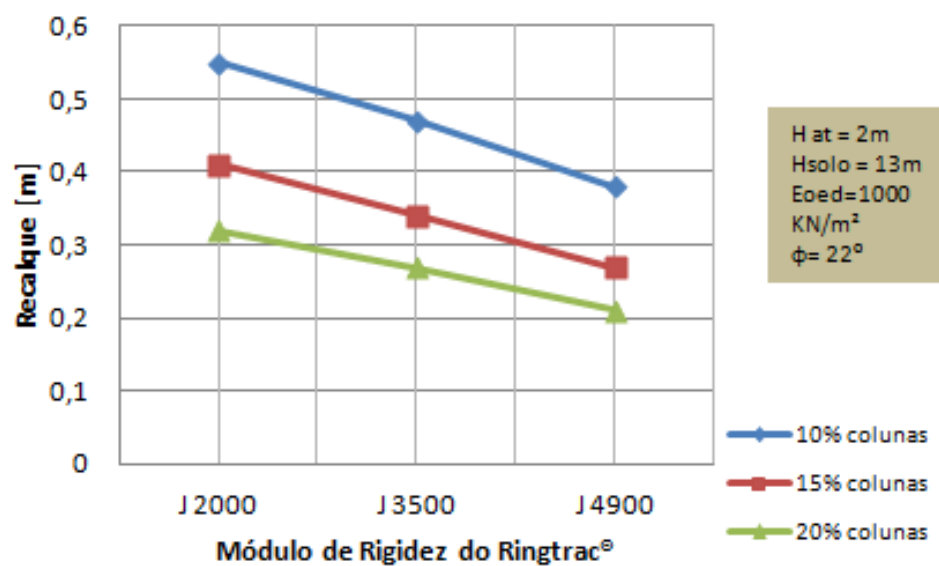
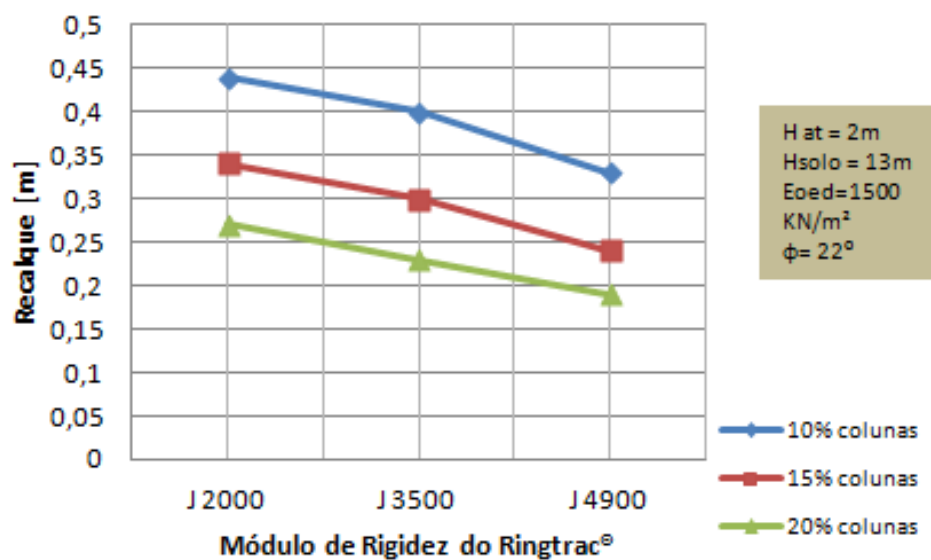


Gráfico 12: Módulo de Rigidez do Ringtrac® vs Recalque para $E_{oed} = 1500 \text{ kN/m}^2$



Para um altura de aterro de 2m, com o peso específico do material de aterro sendo 19 kN/m², o que equivale à uma carga permanente de aproximadamente 38 kN/m² no solo, observou-se que:

- Para casos onde a percentagem de colunas no solo é 10%, a diminuição máxima dos recalques devido ao Módulo Oedométrico é de aproximadamente 33%, sendo que os valores médios de minoração dos recalques são de aproximadamente 25%.
- Para casos onde há 15% de colunas na área total da obra, a diminuição máxima dos recalques devido ao Módulo Oedométrico é de aproximadamente 30%, sendo os valores médios de minoração dos recalques são de aproximadamente 20%
- E para casos onde há 20% de colunas no total da área estudada, a diminuição máxima dos recalques devido ao Módulo Oedométrico é de aproximadamente 30%, sendo os valores médios de minoração de aproximadamente 15% a 20%.
- Observa-se também que o aumento do Módulo de Rigidez do geossintético (de J 2000 para J 3500, para J 4900) pode significar uma diminuição em até 25% do recalque da coluna e no solo.

Altura de aterro = 4m

Gráfico 13: Módulo de Rigidez do Ringtrac® vs Recalque para $E_{oed} = 500 \text{ kN/m}^2$

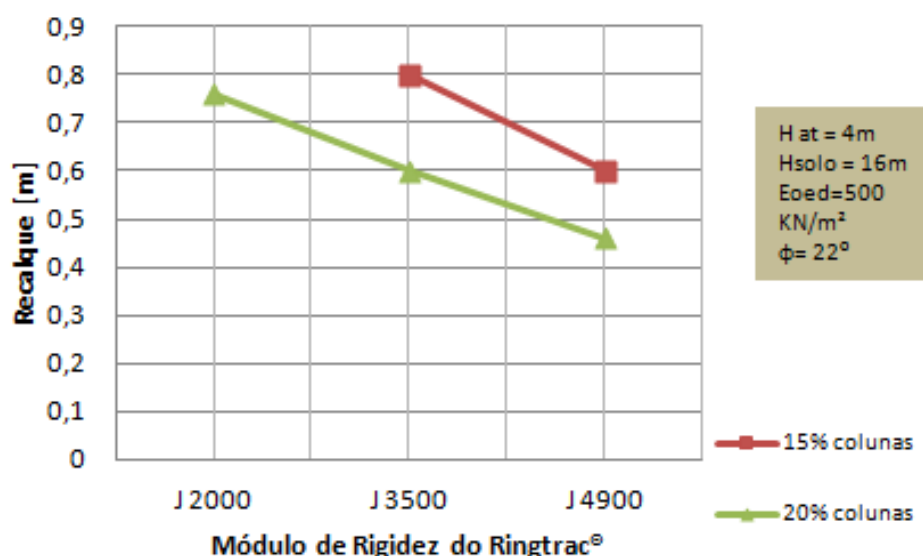


Gráfico 14: Módulo de Rigidez do Ringtrac® vs Recalque para $E_{oed} = 1000 \text{ kN/m}^2$

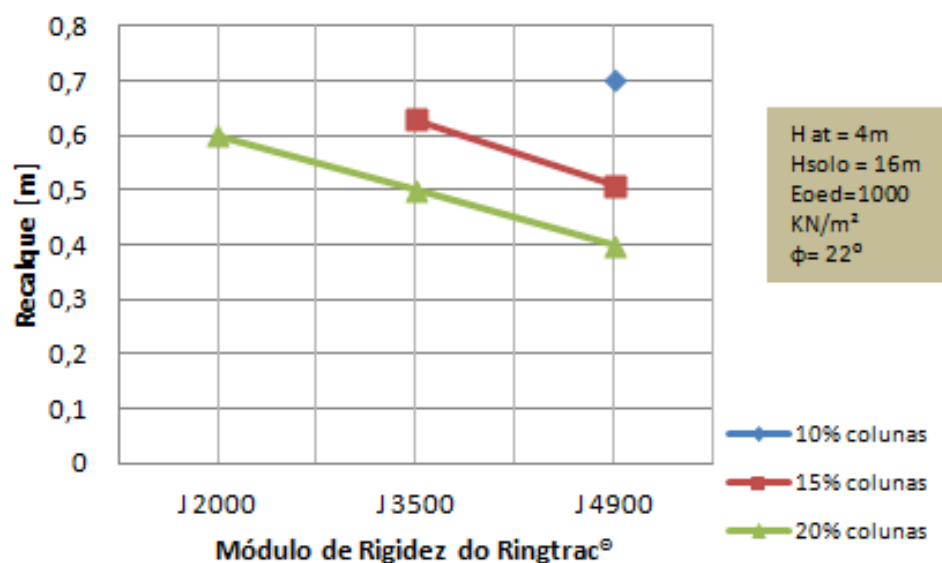
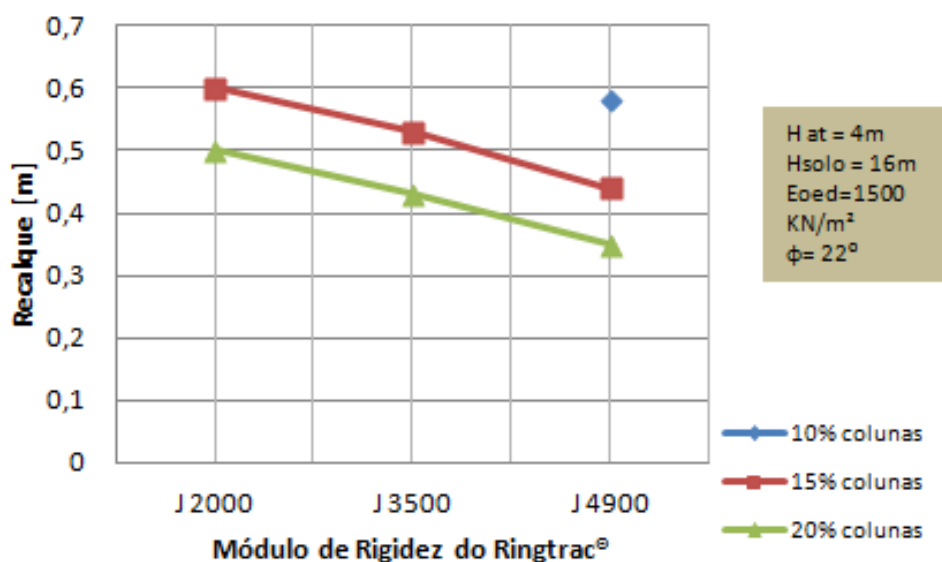


Gráfico 15: Módulo de Rigidez do Ringtrac® vs Recalque para $E_{oed} = 1500 \text{ kN/m}^2$



Para um altura de aterro de 4m, com o peso específico do material de aterro sendo 19 kN/m^2 , o que equivale à uma carga permanente de aproximadamente 76 kN/m^2 no solo, observou-se que:

- Para casos onde a porcentagem de colunas no solo é 10%, somente usando-se o tecido geotêxtil de maior módulo de rigidez, a deformação do tecido geotêxtil na direção radial não ultrapassará 4%. A diminuição máxima dos recalques devido ao aumento do Módulo Oedométrico é de aproximadamente 18%.
- Para casos onde há 15% de colunas na área total da obra, a diminuição máxima dos recalques devido ao Módulo Oedométrico é de aproximadamente 35%, sendo os valores médios de minoração dos recalques são de aproximadamente 19%.
- E para casos onde há 20% de colunas no total da área estudada, a diminuição máxima dos recalques devido ao Módulo Oedométrico é de aproximadamente 35%, sendo os valores médios de minoração de aproximadamente 15% a 20%.
- Observa-se também que o aumento do Módulo de Rigidez do geossintético (de J 3500 para J 4900) pode significar uma diminuição em até 45% do recalque da coluna e no solo.

Altura de aterro = 6m

Gráfico 16: Módulo de Rigidez do Ringtrac® vs Recalque para $E_{oed} = 500 \text{ kN/m}^2$

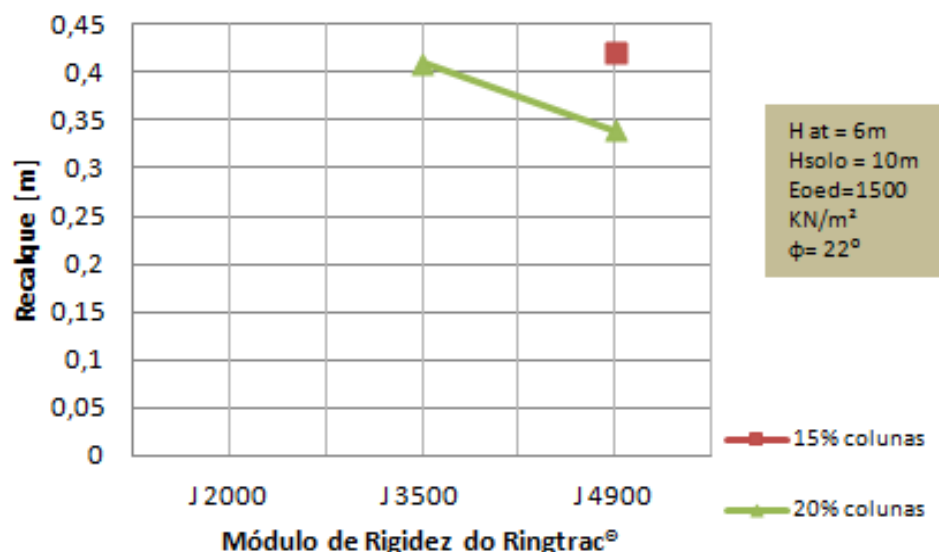


Gráfico 17: Módulo de Rigidez do Ringtrac® vs Recalque para $E_{oed} = 1000 \text{ kN/m}^2$

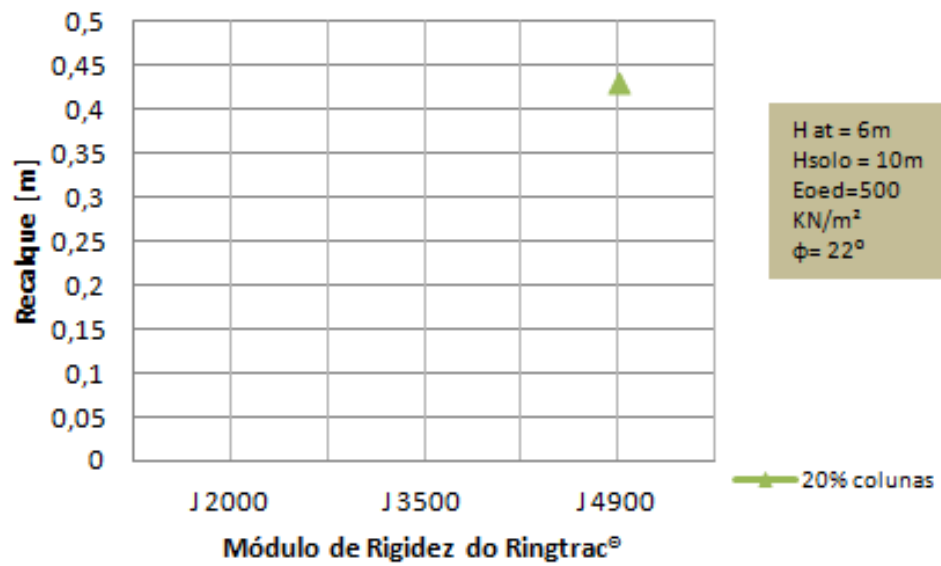
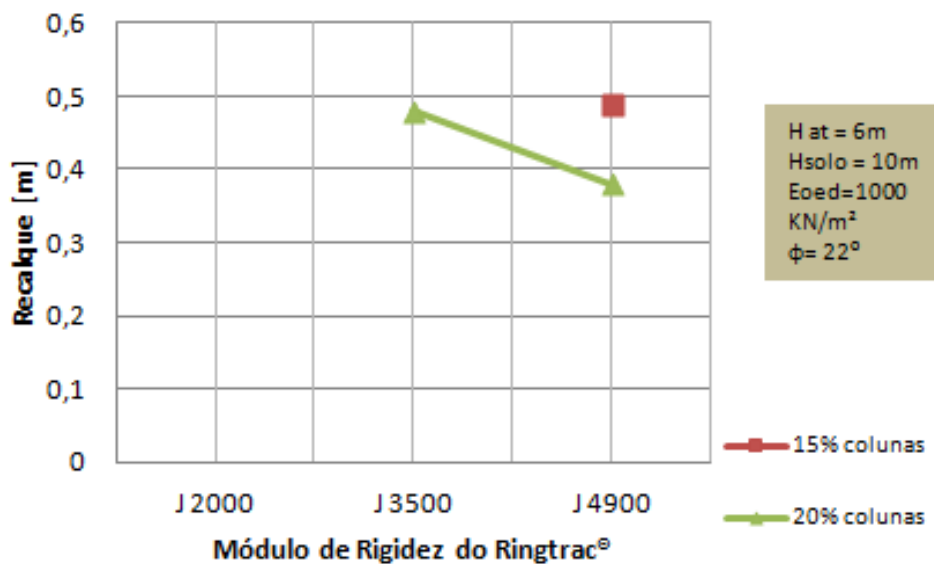


Gráfico 18: Módulo de Rigidez do Ringtrac® vs Recalque para $E_{oed} = 1500 \text{ kN/m}^2$



Para um altura de aterro de 6m, com o peso específico do material de aterro sendo 19 kN/m², o que equivale à uma carga permanente de aproximadamente 114 kN/m² no solo, observou-se que:

- Para casos onde a porcentagem de colunas no solo é 10%, a deformação do geotêxtil para essa carga aplicada, ultrapassa o valor de 4%, que é o máximo permitido para geotêxteis de PVA. Portanto, não é aplicável usar-se esta porcentagem de colunas no total da área, em um caso de obra.
- Para casos onde há 15% de colunas na área total da obra, a diminuição dos recalques devido ao Módulo Oedométrico é de aproximadamente 16%.
- E para casos onde há 20% de colunas no total da área estudada, a diminuição máxima dos recalques devido ao Módulo Oedométrico é de aproximadamente 20%, sendo os valores médios de minoração de aproximadamente 15% a 20%.
- Observa-se também que o aumento do Módulo de Rigidez do geossintético (de J 3500 para J 4900) pode significar uma diminuição em até 30% do recalque da coluna e no solo.

5.2. Ângulo de atrito do solo mole

Para valores constantes de Módulo Oedométrico do solo mole, e altura de aterro, os resultados obtidos para essas situações com diferentes valores de ângulo de atrito do solo são descritos abaixo.

5.2.1. Gráficos: Módulo de Rigidez do geotêxtil Ringtrac® vs Tensão na Coluna

Nos gráficos apresentados abaixo, verifica-se a influência do ângulo de atrito do solo para as tensões efetivas na coluna.

Observa-se que para todos os gráficos, não há influência significativa do ângulo de atrito, sendo os valores de tensão efetiva na coluna praticamente constantes, quando considera-se altura de aterro e módulo Oedométrico constantes.

Gráfico 19: Módulo de Rigidez do Ringtrac® vs Tensão na Coluna para $\phi=20^\circ$

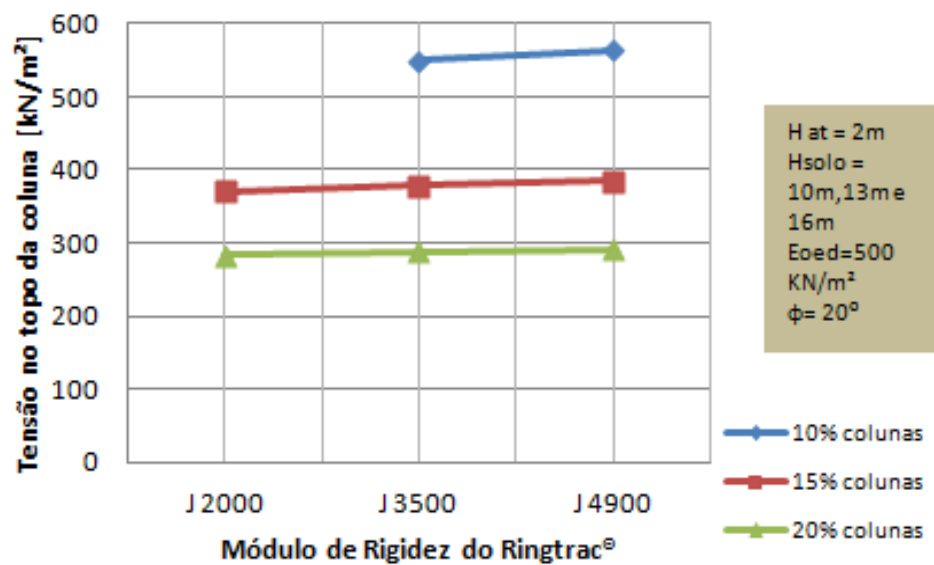


Gráfico 20: Módulo de Rigidez do Ringtrac® vs Tensão na Coluna para $\phi=22^\circ$

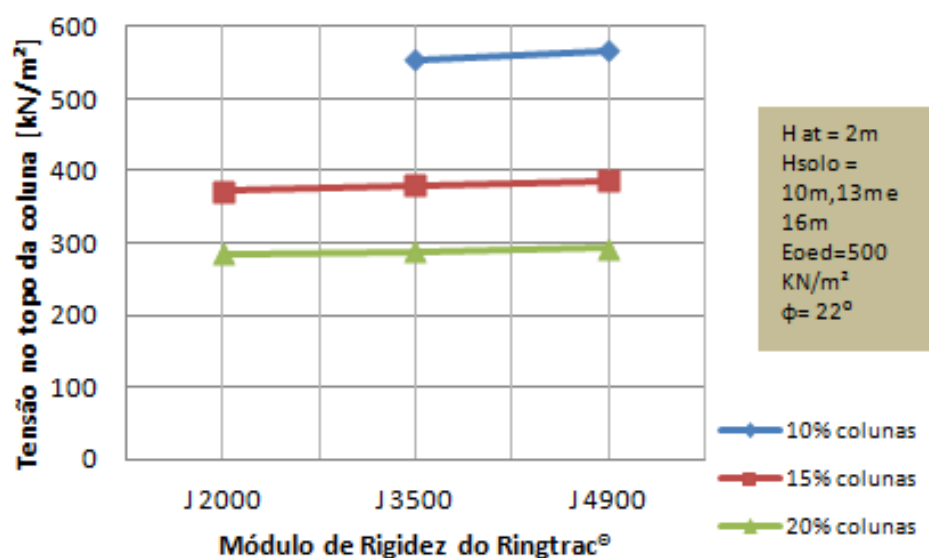
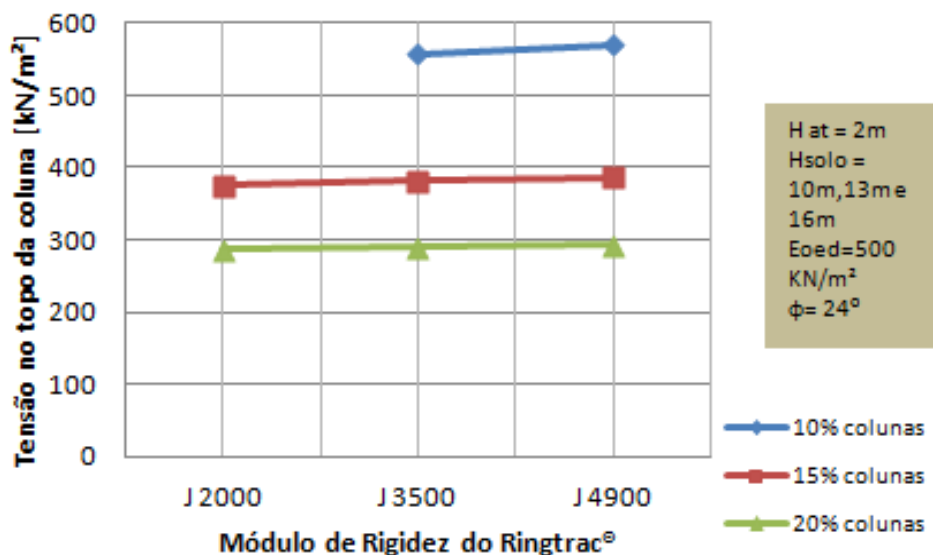


Gráfico 21: Módulo de Rigidez do Ringtrac® vs Tensão na Coluna para $\phi=24^\circ$



5.2.2. Gráficos: Módulo de Rigidez do geotêxtil Ringtrac® vs Recalque

Nos gráficos apresentados abaixo, verifica-se a influência do ângulo de atrito do solo para as tensões efetivas na coluna.

Observa-se que para todos os gráficos, não há influência significativa do ângulo de atrito, sendo os valores de tensão efetiva na coluna praticamente os mesmos, quando considera-se altura de aterro e módulo Oedométrico constantes.

Gráfico 22: Módulo de Rigidez do Ringtrac® vs Recalque para $\phi=20^\circ$

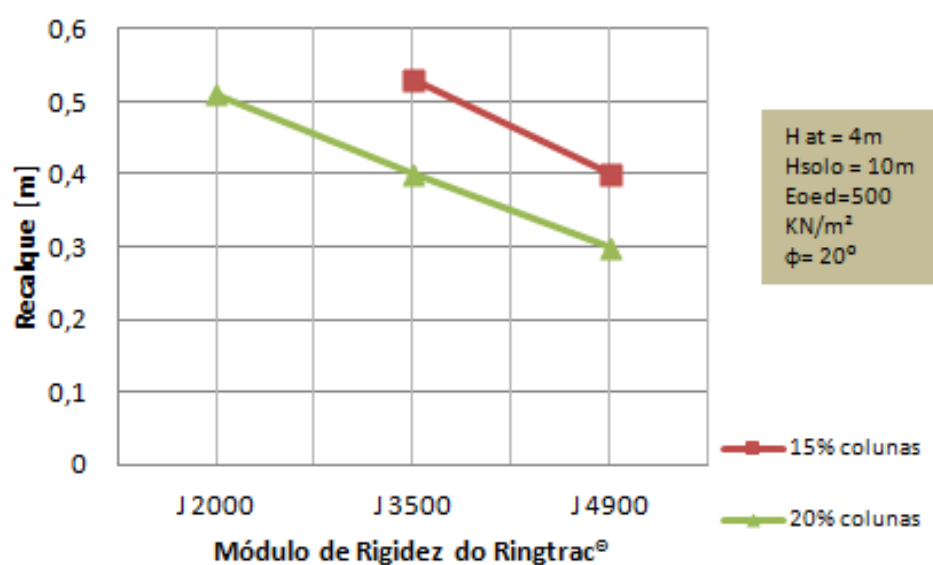


Gráfico 23: Módulo de Rigidez do Ringtrac® vs Recalque para $\phi=22^\circ$

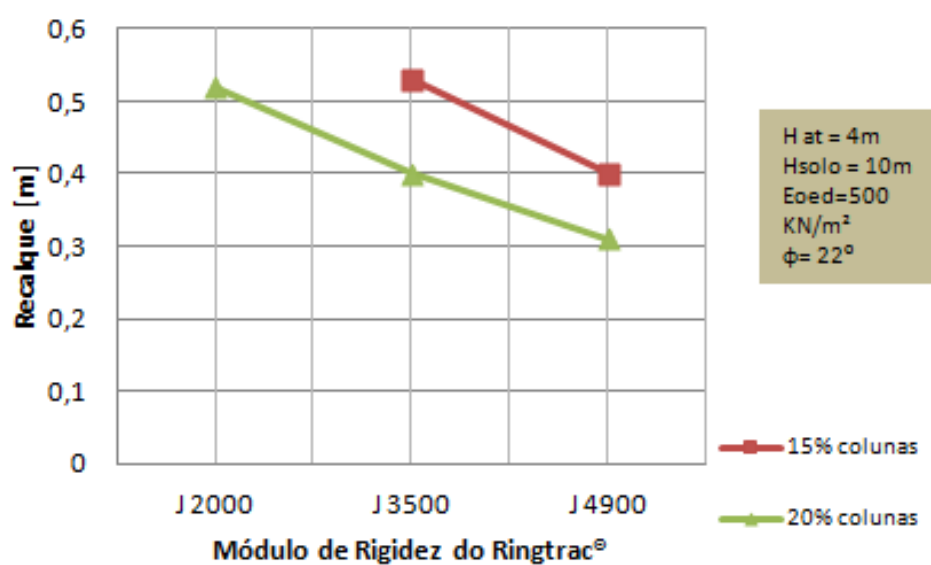
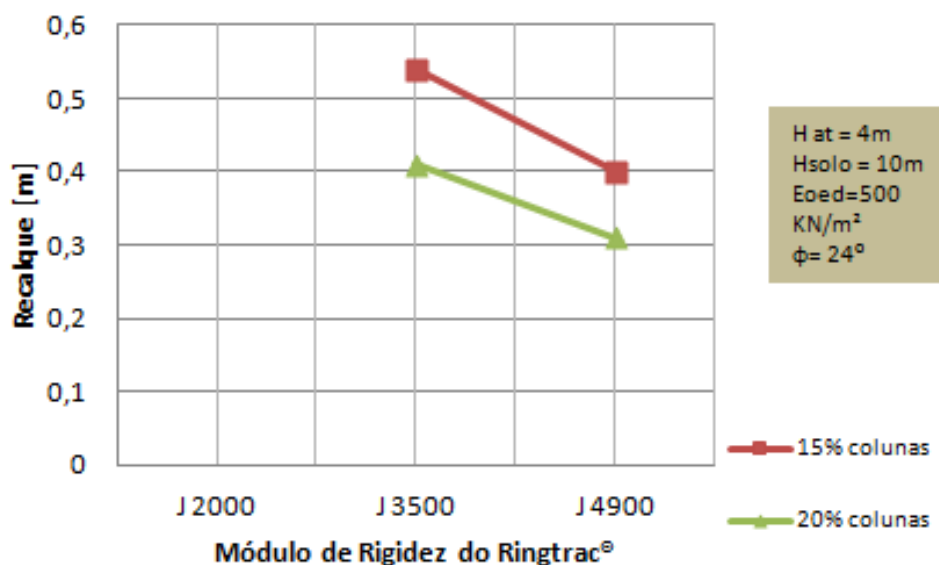


Gráfico 24: Módulo de Rigidez do Ringtrac® vs Recalque para $\phi=24^\circ$



6. CONCLUSÕES

O uso de Colunas Ringtrac® como técnica de melhoria de solo é novo, há menos de 20 anos usa-se essa técnica em escala global. Os resultados de estudos realizados até hoje, mostram a eficácia dessa técnica, principalmente na aceleração da dissipação de recalques, já que a coluna também atua como um sistema drenante para o solo.

Há grande necessidade de aprofundamento de estudos nessa área, para se conhecer como atua essa técnica em cada tipo de solo, sob diferentes condições de uso do solo, etc..

O estudo feito neste trabalho buscou através do software estabelecer estimativas de resultados de valores de recalques e tensões nas colunas para diferentes condições. Dos resultados obtidos, é possível afirmar preliminarmente que:

- O aumento do ângulo de atrito do solo onde será executada a coluna Ringtrac®, não afetará efetivamente os valores de recalque e tensão na coluna;
- O Módulo Oedométrico do solo influencia significativamente os valores de tensão na coluna e recalque. Quanto maior o Módulo Oedométrico, as tensões na coluna são em média de 15 % a 20% menores e os recalques em média de 20% menores.
- Quanto maior a carga de aterro sobre o solo, menor é a influência que o aumento do Módulo Oedométrico causa neste solo.
- Um fator importante a ser considerado quando se faz o uso dessa técnica é a carga a ser aplicada no solo. Observou-se nesse estudo, que quanto maior a carga aplicada no solo, maior o Módulo de Rigidez requerido pelo material geossintético, maiores as porcentagem de colunas no total da área da obra para que sejam alcançados valores satisfatórios de Fatores de Segurança.
- O Módulo de Rigidez do material influencia significativamente nos valores de tensão na coluna e na diminuição de recalques. Em média, pode-se afirmar que o aumento no Módulo de Rigidez do material geossintético, causa a diminuição de aproximadamente 10% nas tensões sobre a coluna e uma diminuição de em média 25% dos recalques causados no solo e na coluna.

Como conclusão preliminar, a partir das análises realizadas pelo programa Ringtrac®, o estudo mostrou que o uso de Colunas de Material Granular Encamisadas com Geossintético é uma técnica efetiva de melhoria de solo, principalmente na diminuição dos recalques ocorridos no solo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA M.S. & MARQUES,M.E. – Aterros sobre solos moles, 1ª edição, São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

BRÄU,G. (Chairman) – Working group: EBGEO: Recommendations for Design and Analysis of Earth Structures using Geosynthetic Reinforcements, 2ª edição ,Alemanha, Wilhelm Ernst & Sohn, 2011.

MASSAD, F. – Obras de Terra: curso básico de Geotecnia, 1ª edição, São Paulo: Oficina de Textos, 2003.

MASSAD, F. – Solos moles da Baixada Santista: características e propriedades geotécnicas, São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

PINTO, C.S. – Curso Básico de Mecânica dos Solos, 2ª edição, São Paulo: Oficina de Textos, 2002.

SANDRONI, S. – Sobre a Prática da Engenharia Geotécnica com dois Solos Difíceis: os Extremamente Moles e os Expansivos, COBRAMSEG, 2010.

VARGAS, M. – Introdução à Mecânica dos Solos, McGraw Hill do Brasil.

VELLOSO, D. & LOPES, F. – Fundações, 1ª edição, São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

VERTEMATTI, J. C. – Manual Brasileiro de Geossintéticos, 1ª edição, São Paulo: Edgard Blücher, 2004.