

DANIELLE CAROLINE FERREIRA

Análise da Estabilidade Global para Sistema de Colunas Granulares Encamisadas com Geossintéticos

Guaratinguetá - SP
2016

DANIELLE CAROLINE FERREIRA

Análise da Estabilidade Global para Sistema de Colunas Granulares Encamisadas com Geossintéticos

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Civil.

Orientador (a): Prof. Dr. George de Paula Bernardes
Coorientador (a): Eng. Thiago Ordonho Araújo

Guaratinguetá
2016

F383a

Ferreira, Danielle Caroline

Análise da estabilidade global para sistema de colunas granulares encamisadas com geossintéticos / Danielle Caroline Ferreira – Guaratinguetá, 2016.

126 f. : il.

Bibliografia : f. 124-126

Trabalho de Graduação em Engenharia Civil – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2016.

Orientador: Prof. Dr. George de Paula Bernardes

1. Geotexteis 2. Colunas 3. Solos – Consolidação 4. Recalque de estruturas I. Título

CDU 624.131.37

DANIELLE CAROLINE FERREIRA

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. GEORGE DE PAULA BERNARDES
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


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


Eng. THIAGO ORDONHO ARAÚJO
Coorientador/HUESKER LTDA


Prof. Dr. PAULO VALLADARES SOARES
UNESP-FEG

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pelas minhas vitórias e realizações, pelo aprendizado adquirido com as dificuldades, pelas pessoas especiais que tem cruzado a minha vida e pela minha saúde e fé que nunca faltaram para seguir em frente,

ao meu orientador, Dr. George de Paula Bernardes pelo seu incentivo e dedicação,

ao meu coorientador, Eng. Thiago Ordonho Araújo por ter sido fundamental no desenvolvimento desse trabalho não só por tudo que me ensinou, mas também pela sua amizade e carinho,

aos meus queridos pais Severino e Lêda por todo amor e zelo, por sempre incentivarem os meus estudos e torcerem pelo meu sucesso, proporcionando o melhor para minha educação e desenvolvimento pessoal,

ao meu namorado João Pedro, pelo amor, companheirismo, apoio e amizade durante todos estes anos de faculdade sempre me fazendo acreditar que sou capaz de enfrentar todas as dificuldades,

aos meus colegas da HUESKER, em especial à Eng. Cristina, por terem me auxiliado no período de estágio com muita paciência e dedicação,

aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar.

“É preciso estudar muito para saber um pouco.”

Montesquieu

RESUMO

Esse trabalho apresenta resultados de análises de estabilidade global de sistemas de colunas granulares encamisadas com geossintéticos (GEC) a fim de apresentar algumas das metodologias existentes para representação das colunas no modelo. A primeira metodologia apresentada foi desenvolvida por Priebe (1995) o qual propõe representar o solo melhorado com uso das colunas como um solo homogêneo com parâmetros ponderados. Já a proposta adaptada de Priebe (1995) apresentada por Araújo, Schmidt e Brugger (2016) considera a representação do carregamento do aterro e da sobrecarga no modelo como cargas concentradas sobre as colunas e sobre o solo mole, obtidas com a metodologia de cálculo de Raithel e Kempfert (2000) para dimensionamento do geotêxtil. Há ainda uma proposta desenvolvida por Raithel (1999) que considera a representação do confinamento devido ao encamisamento geotêxtil no modelo como uma coesão equivalente fictícia do material de preenchimento das colunas. Para essas metodologias, as análises de estabilidade global foram desenvolvidas por método equilíbrio limite que partem do princípio de ruptura circular para determinação do Fator de Segurança. Nesse trabalho, será adotado apenas o Método de Bishop Simplificado para obtenção do Fator de Segurança, fazendo-se uso do *software* Slide 6.0. Para uma avaliação mais completa, também realizou-se análises de estabilidade global através de análise numérica por elementos finitos, fazendo-se uso do *software* PLAXIS 2D, a partir da metodologia de representação das colunas proposta por Raithel (1999) que considera que o ganho de resistência das colunas devido ao encamisamento pode ser representado por ângulo de atrito interno efetivo equivalente fictício do material de preenchimento. Para comparar os resultados obtidos com cada metodologia levando em consideração as possíveis influências dos parâmetros mais favoráveis ou desfavoráveis à estabilidade, diversas análises são apresentadas variando-se os parâmetros do solo mole e do material de preenchimento das colunas adotados e até sua taxa de cobertura.

PALAVRAS-CHAVE: GEC. Colunas Granulares Encamisadas. Estabilidade global.

ABSTRACT

This paper presents results of global stability analysis for geosynthetic-encased granular columns system (GEC) in order to present some methodologies for representing the columns in the model. The first methodology presented was developed by Priebe (1995), which purpose to represent the improved soil with the use of columns as a homogeneous soil with weighted parameters. The methodology adapted of Priebe (1995) by Araújo, Schmidt and Brugger (2016) considers the representation of the loading of the embankment and other loadings in the model as concentrated loads on the columns and on the soft soil, obtained with the calculation methodology Raithel and Kempfert (2000) for the design of the geotextile. There is also a proposal developed by Raithel (1999) which considers the representation of confinement due to geotextile in the model as an equivalent cohesion of the column filler material. For these methods, the global stability analyzes were developed using limit equilibrium calculations to determine the safety factor by circular failure surface. In this paper, it will only be adopted Simplified Bishop Method for obtaining safety factor by Slide 6.0 *software*. For a more complete evaluation, were developed global stability analysis through the finite element method by Plaxis 2D *software* using a methodology created by Raithel (1999) which considers the representation of the resistance gain due to geotextile in the model as an equivalent effective friction angle of the column filler material.to verify the stability. To compare the results obtained with each methodology taking into account the possible influences of favorable or unfavorable parameters to stability, various analysis are presented by varying the parameters of soft soil, columns fill material and coverage rate adopted.

KEYWORDS: GEC. Encased Granular Columns. Global Stability.

LISTA DE SÍMBOLOS

FR	fator de redução global
FR_f	fator de redução devido à fluência para o período de projeto de atuação do reforço
FR_i	fator de redução devido a danos mecânicos de instalação
FR_{dq}	fator de redução devido à degradação ambiental química
FR_{amb}	fator de redução devido à degradação ambiental biológica
T_{adm}	resistência à tração admissível
T_{nom}	resistência à tração nominal
FS	Fator de Segurança
τ_{solo}	tensão de cisalhamento média de um solo
τ_{mob}	tensão de cisalhamento média desenvolvida ao longo da superfície potencial de ruptura
c'	coesão efetiva do solo
σ'	tensão normal efetiva do solo
φ'	ângulo de atrito interno efetivo do solo
τ_{ref}	resistência do reforço geossintético
N	força normal efetiva atuante na base da lamela
U	força resultante das pressões neutras na base da lamela
α	ângulo formado entre a força normal à base da lamela e a vertical
T	força de resistência ao cisalhamento mobilizada pelo solo na base da lamela
W	peso da lamela
u	poropressão
l	comprimento da base da lamela
b	largura da lamela
$K_{a,c}$	coeficiente de empuxo ativo do material da coluna
$K_{0,s}$	coeficiente de empuxo em repouso
$K_{0,s}^*$	coeficiente de empuxo em repouso majorado
σ_0	tensão total devido a sobrecargas e peso próprio do aterro
A_E	área equivalente da célula unitária
$\sigma_{v,c}$	acréscimo de tensão vertical que atua sobre as colunas devido a sobrecargas
A_c	área da seção transversal de uma coluna
$\sigma_{v,s}$	acréscimo de tensão vertical que atua sobre o solo mole devido a sobrecargas
$\Delta\sigma_{h,c}$	acréscimo de tensão horizontal nas colunas devido à concentração de cargas
$\sigma_{v,0,c}$	tensão vertical inicial sobre a coluna
$\Delta\sigma_{h,s}$	acréscimo de tensão horizontal no solo mole devido à concentração de cargas
$\sigma_{v,0,s}$	tensão vertical inicial sobre o solo mole
φ'_c	ângulo de atrito interno efetivo do material de preenchimento da coluna
T_{geo}	tração mobilizada no reforço geossintético
J	módulo de rigidez do geossintético
Δr_{geo}	variação do raio geossintético mobilizado
r_{geo}	raio do geossintético mobilizado
$r_{geo,0}$	raio inicial do geossintético
$\varepsilon_{geo,max}$	deformação máxima do geossintético
$\Delta\sigma_{h,geo}$	tensão horizontal no geossintético
$\Delta\sigma_{h,diff}$	diferença de tensões horizontais
Δr_c	variação do raio da coluna granular

E^*	fator auxiliar
a_E	taxa de cobertura
r_c	raio da coluna granular
s_s	recalque do solo mole
$E_{oed,s}$	módulo edométrico do solo mole
ν_s	coeficiente de Poisson do solo mole
h	altura do aterro
s_c	recalque da coluna granular
r_0	raio inicial da coluna
h_0	altura inicial da coluna
h_c	altura da coluna granular
$E_{oed,s,ref}$	módulo edométrico de referência
p^*	tensão existente
p_{ref}	tensão de referência
e	expoente
c'_m	coesão efetiva do solo equivalente (Priebe)
φ'_m	ângulo de atrito do solo equivalente (Priebe)
γ_m	peso específico equivalente (Priebe)
m	fator de concentração de tensões na coluna
n	fator de melhoria
m^*	fator reduzido de concentração de tensões na coluna
φ'_s	ângulo de atrito efetivo interno do solo mole
c'_s	coesão efetiva do solo mole
c'^*_m	coesão efetiva do solo equivalente proporcional ao carregamento
γ_c	peso específico da coluna granular
γ_s	peso específico do solo mole
c_{eq}	coesão equivalente (Raithel)
$\varphi'_{c,eq}$	ângulo de atrito interno efetivo equivalente (Raithel)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	13
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1	GEOSSINTÉTICOS QUE COMPÕEM O SISTEMA DE COLUNAS GRANULARES ENCAMISADAS	14
3.1.1	Geotêxtil	14
3.1.2	Geogrelha	15
3.2	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E MÓDULO DE RIGIDEZ DO REFORÇO GEOSSINTÉTICO	16
3.3	COLUNAS GRANULARES ENCAMISADAS COM GEOSSINTÉTICOS	17
3.4	PROCEDIMENTO CONSTRUTIVO DAS COLUNAS GRANULARES ENCAMISADAS	18
3.4.1	Método de deslocamento	19
3.4.2	Método de escavação	20
3.5	EFEITO DO ARQUEAMENTO	20
3.6	ESTABILIDADE GLOBAL E FATOR DE SEGURANÇA	21
3.6.1	Influência do reforço geossintético no Fator de Segurança	22
3.7	ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TALUDES PELO MÉTODO DE BISHOP SIMPLIFICADO	23
3.7.1	Método de Bishop Simplificado	23
3.8	METODOLOGIA DE CÁLCULO PARA DIMENSIONAMENTO DO REVESTIMENTO GEOTÊXTIL	25
3.9	REPRESENTAÇÃO DAS COLUNAS NAS METODOLOGIAS DE CÁLCULO PARA ANÁLISE DA ESTABILIDADE GLOBAL PARA O SISTEMA GEC	29
3.9.1	Representação das colunas pelo método de Priebe considerando área equivalente	29
3.9.2	Representação das colunas pelo método adaptado de Priebe considerando modelo das cargas concentradas	31
3.9.3	Representação das colunas pelo modelo da coesão equivalente proposto por Raithel	32
3.9.4	Representação das colunas pelo modelo do ângulo de atrito interno efetivo equivalente proposto por Raithel	33
3.10	SOFTWARES USADOS PARA REALIZAÇÃO DAS ANÁLISES	35
3.10.1	RingtracS	35
3.10.2	Slide 6.0	35
3.10.3	PLAXIS 2D	36
3.11	CASOS DE OBRAS	38
3.11.1	Hamburgo	38
3.11.2	Brasil	39
4	MATERIAIS E MÉTODOS	40
4.1	CASO MODELO	42
4.2	CASO SOLO MOLE	43
4.3	CASO MATERIAL PREENCHIMENTO	43
4.4	CASO TAXA COBERTURA	44

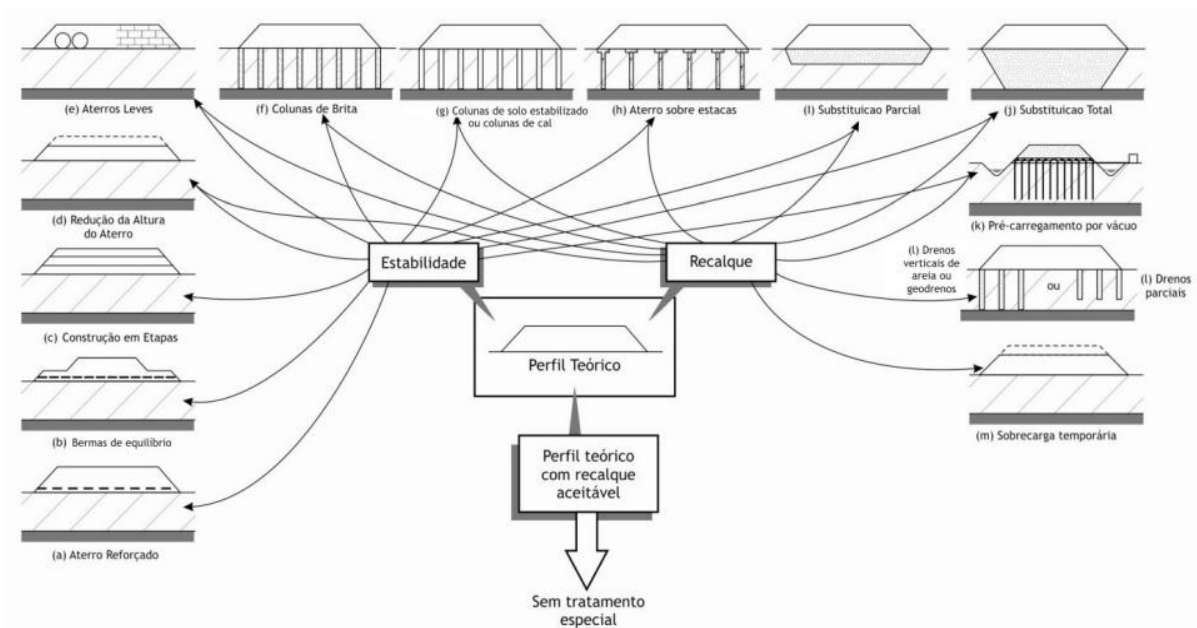
5	ANÁLISES E RESULTADOS	45
5.1	CASO MODELO	45
5.1.1	Dimensionamento do geotêxtil	45
5.1.2	Análises de estabilidade global	46
5.2	CASO SOLO MOLE	51
5.2.1	Estudo A	51
5.2.2	Estudo B	57
5.2.3	Estudo C	63
5.3	CASO MATERIAL PREENCHIMENTO	67
5.3.1	Estudo A com preenchimento de areia	67
5.3.2	Estudo B com preenchimento de areia	73
5.3.3	Estudo C com preenchimento de areia	79
5.3.4	Estudo A com preenchimento de brita	83
5.3.5	Estudo B com preenchimento de brita	89
5.3.6	Estudo C com preenchimento de brita	95
5.4	CASO TAXA COBERTURA	99
5.4.1	Estudo A	99
5.4.2	Estudo B	105
5.4.3	Estudo C	111
6	DISCUSSÃO	115
6.1	METODOLOGIAS POR EQUILÍBRIO LIMITE: AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS	116
6.2	METODOLOGIAS POR ELEMENTOS FINITOS: AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS COMPARADOS AOS OBTIDOS POR METODOLOGIAS POR EQUILÍBRIO LIMITE	117
6.3	INFLUÊNCIA DO TIPO DE MATERIAL DE PREENCHIMENTO NAS ANÁLISES	118
6.4	ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS PELA METODOLOGIA DA ÁREA EQUIVALENTE POR PRIEBE	119
6.5	COMPARAÇÃO DOS ESTUDOS A E C DE CADA CASO EM TERMOS DE FS	119
6.6	CORRELAÇÃO LINEAR ENTRE METODOLOGIAS	120
7	CONCLUSÃO	122

1 INTRODUÇÃO

A necessidade da indústria da construção civil em realizar obras cada vez mais grandiosas em áreas cujo solo apresente baixa capacidade de suporte tem desafiado as engenharias civil e geotécnica a criar soluções que aliem técnica, economia, prazo e segurança. No Brasil, solos com essas características se situam, sobretudo, nas regiões litorâneas onde há a ocorrência de camadas espessas de solos argilosos moles compressíveis.

Para isso, faz-se necessário o estudo de métodos construtivos para se executar aterros sobre solos com baixa capacidade de suporte que minimizem ou erradiquem os problemas de recalque e estabilidade. Algumas soluções possíveis podem ser vistas na Figura 1.1 a seguir. Segundo Almeida e Marques (2010), a escolha do método mais adequado depende das características geotécnicas dos depósitos, disponibilidade de área, prazos e custos.

Figura 1.1 – Métodos construtivos de aterros sobre solos moles.



Fonte: Almeida e Marques (2010)

Um método inovador desenvolvido em 1994 e presente no Brasil desde 2006 é a técnica de melhoramento do solo através da aplicação de colunas granulares encamisadas com geossintéticos. Segundo EBGeo (2010), essa técnica apresenta vantagens como:

- Redução de recalques totais e recalques diferenciais;
- Aceleração de recalques e dissipação do excesso de poropressão (pelas colunas atuarem também como drenos);

- Aumento da estabilidade durante e após a fase de construção.

Como essa tecnologia ainda é recente, estudos e análises são de grande importância para se ampliar e aprofundar os conhecimentos nessa inovação.

Historicamente, a disseminação do uso de novas tecnologias de fundações especiais no Brasil ocorre antes que a comunidade técnica domine plenamente todas as variáveis de projeto e do controle de execução dessas técnicas, o que em alguns casos, resulta em desperdício de recursos e/ou desempenho insatisfatório das obras (SOUZA et al, 2016).

Existem diversas metodologias para o dimensionamento do encamisamento geotêxtil, sendo a metodologia de cálculo de Raithel e Kempfert (2000) a mais consolidada no meio geotécnico. Contudo, segundo Araújo, Schmidt e Brugger (2016), a maior dificuldade para análise dessa tecnologia está, sobretudo, na representação das colunas no modelo para a verificação da estabilidade global do aterro-fundação e, conseqüentemente, na determinação do reforço na base do aterro (resistência geogrelha).

2 OBJETIVOS

Esse trabalho tem como objetivo apresentar as metodologias de cálculo desenvolvidas por Priebe (1995) e Raithel (1999) quando aplicadas à representação das colunas granulares encamisadas com geossintéticos no modelo. Para obtenção do Fator de Segurança (FS) que representa a estabilidade da análise, utilizar-se-á o *software* Slide 6.0 que desenvolverá as análises pelo Método de Bishop Simplificado e o *software* PLAXIS 2D para verificação da estabilidade por análise numérica utilizando Método de Elementos Finitos.

Para comparação dos resultados obtidos com cada metodologia, diversas análises serão apresentadas para avaliar se a alteração em parâmetros do solo mole, do material de preenchimento das colunas ou se o valor da taxa de cobertura tem influência sobre algum método. Para uma comparação mais abrangente, visa-se, ainda, a verificação de correlação linear entre as metodologias de representação das colunas estudadas nesse trabalho.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 GEOSSINTÉTICOS QUE COMPÕEM O SISTEMA DE COLUNAS GRANULARES ENCAMISADAS

Segundo a International Geosynthetic Society (IGS), geossintéticos são materiais industrializados com pelo menos um de seus componentes fabricado com polímero sintético ou natural sendo em sua maioria derivados de petróleo, como a poliamida (PA), o policloreto de vinila (PVC), de poliéster (PET), poliestireno expandido (EPS), polietileno (PE) e polipropileno (PP). Podem se apresentar na forma de manta, tira, ou estrutura tridimensional, e são utilizados em contato com o solo ou com outros materiais em aplicações da engenharia civil, geotécnica e ambiental.

De acordo com Vertematti (2015), as principais funções dos geossintéticos são de: controle de erosão superficial, drenagem, filtração, impermeabilização, proteção, reforço e separação de camadas de solo. Desse modo, existem diversos tipos de geossintéticos que podem ser classificados de acordo com seus processos de fabricação e de suas funções/aplicações.

Para o sistema de colunas granulares encamisadas (GEC) são utilizados apenas dois tipos que estão descritos a seguir.

3.1.1 Geotêxtil

Segundo Vertematti (2015), geotêxtil é um material têxtil bidimensional permeável, fabricado com polímero natural ou sintético, podendo ser tecido, não tecido ou tricotado aplicado em obras geotécnicas e civis.

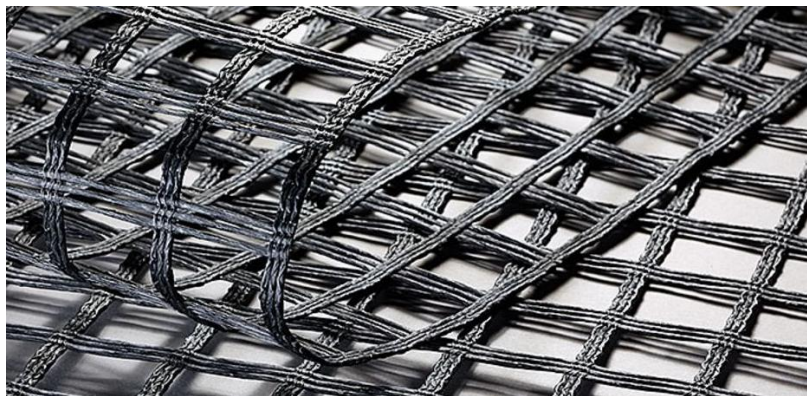
No sistema GEC, o geotêxtil é o material instalado em volta da coluna para que, a partir de sua resistência à tração, promova confinamento lateral à coluna. Além disso, impede a mistura do material de preenchimento com o solo mole do entorno e, por ser um material permeável, garante drenagem, ou seja, acelera o processo de adensamento além de aumentar a capacidade de suporte do solo.

Uma característica importante que o encamisamento geossintético das colunas granulares deve possuir é ausência de juntas ou costuras para não criar zonas de fraqueza que reduza o módulo de rigidez na sua extensão.

3.1.2 Geogrelha

Segundo Vertematti (2015), geogrelha é definida como um produto com estrutura polimérica planar constituído por uma malha aberta de elementos resistentes à tração, cujas aberturas permitem interação com o meio em que estão confinadas e sua principal finalidade é de reforço.

Figura 3.1 – Geogrelha.

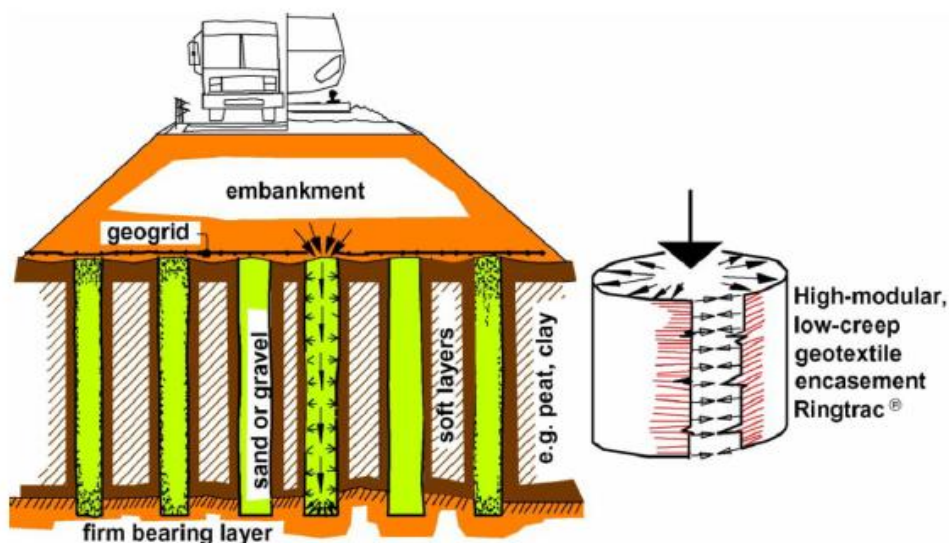


Fonte: Website da Huesker

A utilização de geogrelha no sistema de colunas encamisadas, segundo Nikolaou (2015), não é obrigatória, ficando a critério do projetista. De acordo com EBGEO (2010), a geogrelha é inserida a 30 cm do topo das colunas para aumentar a concentração das cargas do aterro para o topo das colunas garantindo maior estabilidade global e compensação de recalques.

A geogrelha é instalada no sistema como representado na Figura 3.2 a seguir.

Figura 3.2 - Uso do geotêxtil e da geogrelha no sistema de colunas granulares encamisadas com geossintéticos e esquema de funcionamento do sistema.



Fonte: Adaptado de Alexiew et al (2003)

3.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E MÓDULO DE RIGIDEZ DO REFORÇO GEOSSINTÉTICO

A resistência à tração e o módulo de rigidez do material geossintético são parâmetros fundamentais para o cálculo da análise da estabilidade de aterros construídos sobre solos moles que apresentem geossintéticos em seu sistema construtivo.

Segundo Almeida e Marques (2010), o ensaio de tração de faixa larga, normatizado conforme NBR 12824 (ABNT, 1993), permite a obtenção da curva carga distribuída pela deformação do geossintético para a condição de carregamento rápido. Assim, o ensaio fornece a resistência à tração nominal e a deformação específica nominal que são valores atingidos no momento da ruptura do material. Considerando que o comportamento tensão deformação dos geossintéticos são lineares, é possível se obter também a magnitude do módulo de rigidez nominal como a razão entre esses dois parâmetros citados.

Geralmente, esses parâmetros encontram-se nos catálogos dos fabricantes de geossintéticos para especificar a qualidade do produto. Contudo, esses valores não podem ser utilizados diretamente sobre o cálculo da estabilidade, pois segundo Lopes e Lopes (2010) o

geossintético apresenta limitação quanto a sua durabilidade devido a vários agentes e mecanismo de degradação. Por isso, há a necessidade de se minorar a resistência do geossintético através de fatores de redução, também fornecidos pelos fabricantes. Segundo a recomendação britânica BS 8006-1, o fator de redução global (FR) é composto pelos fatores de redução parciais segundo a equação 3.1 a seguir.

$$FR = FR_f \cdot FR_i \cdot FR_{dq} \cdot FR_{amb} \quad (3.1)$$

Além de variarem de acordo com os fatores de degradação aos quais o geossintético está exposto, os valores dos fatores de redução variam também de acordo com o tipo de geossintético (geogrelha, geotêxtil, geomembrana etc.) e do polímero do qual ele é feito (PVA, PET etc.).

Tabela 3.2 - Faixa de valores de fatores de redução para cálculo da resistência à tração admissível de geotêxtil e geogrelha.

Fatores de redução	Geotêxtil	Geogrelha
FR_i	1,1 – 2,0	1,1 – 2,0
FR_{dq}	1,0 – 1,5	1,1 – 1,4
FR_{db}	1,0 – 1,3	1,0 – 1,2
FR_{amb}	2,0 – 3,5	2,0 – 3,0

Fonte: Almeida e Marques (2010)

A recomendação britânica BS 8006-1 dita que a resistência à tração admissível (T_{adm}), que deve ser comparada com a resistência de projeto, é dada segundo a equação 3.2 a seguir.

$$T_{adm} = \frac{T_{nom}}{FR_f \cdot FR_i \cdot FR_{dq} \cdot FR_{amb}} \quad (3.2)$$

3.3 COLUNAS GRANULARES ENCAMISADAS COM GEOSSINTÉTICOS

Segundo Galhardo (2011), a tecnologia de colunas granulares encamisadas com geossintético foi inicialmente estudada por Van Impe nos anos 80, mas, de acordo com Nikolaou (2015), passou a ser desenvolvida a partir de 1994 pela construtora Möbius em parceria com companhia HUESKER Synthetic. Conforme Silva, Schmidt e Andrade (2008), o uso do sistema GEC no Brasil ainda é bem recente, sendo datada a primeira aplicação em obra em 2006 em São José dos Campos.

Trata-se de uma técnica alternativa às colunas granulares convencionais, pois, segundo EBGEO (2010), o encamisamento geotêxtil fornece grande confinamento lateral para o material de preenchimento, permitindo que o sistema seja aplicado em solos com resistência não drenada menor que as mínimas admitidas para aplicação das colunas granulares convencionais. Além de atuar como elemento confinante, de acordo com Galhardo (2011), o encamisamento permite a separação entre o material de preenchimento e o solo mole do entorno e que por ser permeável, garante também a drenagem do solo acelerando o processo de adensamento.

Conforme EBGEO (2010), as colunas granulares encamisadas transmitem o carregamento oriundo do aterro e das sobrecargas (operacionais, acidentais e permanentes) sobre o solo mole para uma camada de solo competente (alta capacidade de suporte), sendo essa transferência potencializada pelo efeito de arqueamento do solo do aterro. Outra maneira para se maximizar a transmissão de cargas para o topo das colunas é fazendo aplicação de geogrelha sobre as colunas de modo a “cobrir” o solo mole.

Com o carregamento vertical no topo das colunas, estas começam a recalcar devido principalmente às deformações radiais. Com o objetivo de impedir ou minimizar essa expansão lateral (ou embarrigamento, “bulging” em inglês), forças anelares de tração são mobilizadas no próprio geossintético, normalmente na faixa de 1% a 4% da deformação anelar, assim inevitavelmente algumas deformações radiais ocorrem nas colunas. Portanto, o sistema de colunas encamisadas com geossintéticos, não consegue ser completamente livre de recalque no topo das colunas (NIKOLAOU, 2015).

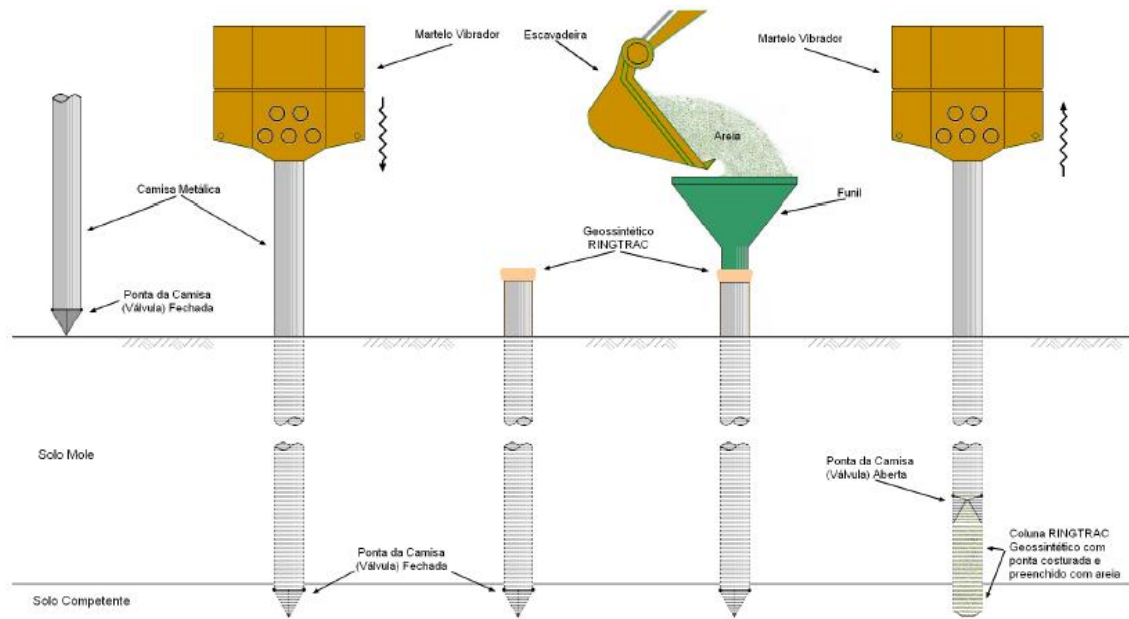
3.4 PROCEDIMENTO CONSTRUTIVO DAS COLUNAS GRANULARES ENCAMISADAS

Segundo EBGEO (2010), a execução de colunas granulares pode ser realizada através de dois procedimentos distintos: método de deslocamento ou método de escavação. A diferença básica entre essas metodologias é a maneira como a coluna granular é inserida no solo. Outro aspecto que os difere que deve ser destacado é o risco de cada método, em termos de qualidade da fundação e impacto nos solos do entorno.

3.4.1 Método de deslocamento

De acordo com Nikolaou (2015), o método executivo com deslocamento da argila é o mais usual. Uma simples representação da instalação das colunas no solo por esse método é representada na Figura 3.3 a seguir.

Figura 3.3 - Esquema de instalação por deslocamento das colunas Ringtrac.



Fonte: Silva, Schmidt e Andrade (2008)

Primeiramente, segundo Silva, Schmidt e Andrade (2008), é feita a cravação de uma camisa metálica tubular com ponta fechada por válvula em comporta. A penetração ocorre graças à utilização de um martelo vibratório compatível com o diâmetro e comprimento da coluna que será executada, acoplado ao topo da camisa. A cravação é realizada até que se atinja a camada de solo competente.

Em sequência, o geossintético é fixado na extremidade do tubo metálico, sendo desenrolado no seu interior. Um funil é então acoplado na parte superior da camisa metálica tubular, permitindo o preenchimento com material granular através de uma retroescavadeira.

Após o preenchimento, ainda de acordo com Silva, Schmidt e Andrade (2008), o funil é retirado e o martelo vibratório é adaptado na cabeça da camisa metálica para compactar o material granular (reduz o volume na ordem de 15% a 20%). Em seguida, a válvula em comporta é aberta e a camisa metálica é içada por cabos de aço acionados pelo guincho do equipamento, que em vibração vai sendo gradativamente sacada do solo.

3.4.2 Método de escavação

Segundo Galhardo (2011), este método executivo é realizado principalmente quando a resistência do solo mole é um pouco melhor, ou seja, quando o solo é mais rijo, de modo a dificultar o método por deslocamento ou quando, segundo Nikolaou (2015), se deseja evitar vibrações em edificações vizinhas.

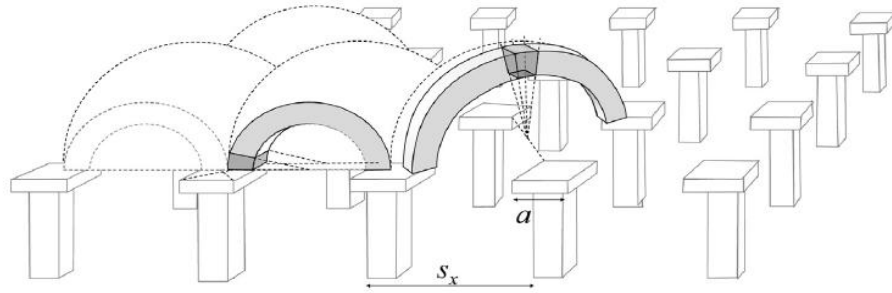
Primeiramente, de acordo com Nikolaou (2015), é feita a cravação de uma camisa metálica tubular de ponta aberta até que se atinja a camada de solo competente. Em seguida, um trado helicoidal é utilizado para remoção do solo mole contido no interior da camisa metálica. O geossintético é então fixado na sua extremidade sendo desenrolado no seu interior. Para o preenchimento com material granular, um funil é acoplado na parte superior da camisa metálica, fazendo uso de uma retroescavadeira para o procedimento. Uma vez que a coluna foi preenchida, o funil é substituído pelo martelo vibratório para compactar o material granular e para, em seguida, auxiliar a remoção da camisa metálica. Com a vibração e através de cabos de aço, a camisa metálica vai sendo gradativamente sacada do solo.

3.5 EFEITO DO ARQUEAMENTO

Terzaghi (1943) nomeia como efeito de arqueamento um fenômeno que ocorre no solo quando este encontra-se sobre uma superfície que possui diferentes módulos de rigidez ao longo do seu plano. No sistema GEC, o solo do aterro se apoia sobre a camada de solo mole e sobre as colunas, sofrendo assim o efeito do arqueamento já que as colunas apresentam módulo de rigidez significativamente superior em relação ao do solo mole do entorno.

Esse fenômeno é fundamental para a eficiência do sistema, já que sua ocorrência faz com que uma grande parcela das tensões geradas pelo aterro seja transferida em forma de arco para o topo das colunas, aliviando, assim, as tensões atuantes sobre a camada de solo mole. Como consequência, de acordo com Nikolaou (2015), a magnitude dos recalques da obra é reduzida, reduzindo assim o tempo para que o adensamento ocorra. A Figura 3.4 a seguir ilustra o mecanismo de funcionamento do efeito de arqueamento.

Figura 3.4 - Esquema do arqueamento no solo.



Fonte: Hewlett e Randolph (1988)

Segundo Nikolaou (2015), o efeito do arqueamento depende, sobretudo, de três fatores:

- Razão entre a rigidez da coluna e do solo mole;
- Distância entre eixos das colunas;
- Altura do aterro.

3.6 ESTABILIDADE GLOBAL E FATOR DE SEGURANÇA

O Fator de Segurança (FS) é o parâmetro utilizado para analisar a estabilidade de taludes. De acordo com Massad (2003), a verificação da estabilidade envolve a determinação das tensões de cisalhamento induzidas, desenvolvidas ao longo da superfície de ruptura mais provável (obtidas pelas equações de equilíbrio) e sua comparação com a resistência ao cisalhamento do solo.

A superfície de ruptura mais provável é aquela que apresenta o menor Fator de Segurança, o que se dá por tentativas, sendo uma tarefa facilitada pelos *softwares* disponíveis no mercado.

Segundo Massad (2003), o Fator de Segurança é definido através da seguinte equação:

$$FS = \frac{\tau_{solo}}{\tau_{mob}} = \frac{c' + \sigma' \tan \phi'}{\tau_{mob}} \quad (3.3)$$

3.6.1 Influência do reforço geossintético no Fator de Segurança

Segundo Duncan, Wright e Brandon (2005), dois métodos, referidos por Método A e Método B, podem ser utilizados para análise de equilíbrio limite para taludes reforçados.

O Método A é usado quando o reforço é ativo, assim, sua resistência é de serviço, não sendo dividida pelo Fator de Segurança calculado, ou seja, somente a resistência do solo é dividida pelo Fator de Segurança calculado na análise de estabilidade. Portanto, de acordo com Duncan, Wright e Brandon (2005) a fórmula para o Fator de Segurança quando existe reforço ativo no talude é expressa com a seguinte configuração:

$$\tau_{mob} = \frac{\tau_{solo}}{FS} + \tau_{ref} \quad (3.4)$$

Isolando o Fator de Segurança para obter-se sua fórmula para reforço ativo, tem-se:

$$FS = \frac{\tau_{solo}}{\tau_{mob} - \tau_{ref}} \quad (3.5)$$

Já o Método B é usado quando o reforço é passivo, assim, sua resistência é última, devendo-se dividi-la pelo Fator de Segurança calculado, ou seja, tanto a resistência do solo quanto a resistência do reforço são divididas pelo Fator de Segurança calculado na análise de estabilidade. Portanto, segundo Duncan, Wright e Brandon (2005), a fórmula para o Fator de Segurança quando existe reforço passivo no talude é expressa com a seguinte configuração:

$$\tau_{mob} = \frac{\tau_{solo}}{FS} + \frac{\tau_{ref}}{FS} \quad (3.6)$$

Isolando o Fator de Segurança para obter-se sua fórmula para reforço passivo, tem-se:

$$FS = \frac{\tau_{solo} + \tau_{ref}}{\tau_{mob}} \quad (3.7)$$

Como já foi citado, no sistema GEC pode-se aplicar geogrelha na base do aterro para potencializar a transferência de cargas para o topo das colunas (efeito membrana). Para geogrelha, por exemplo, o Fator de Segurança adotado para a análise da estabilidade global é obtido pela fórmula do Método B por se tratar de um reforço passivo, ou seja, que não é pré-tracionado.

3.7 ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TALUDES PELO MÉTODO DE BISHOP SIMPLIFICADO

Segundo Freitas (2010), os taludes com características mecânicas homogêneas e sem descontinuidades marcadas que atingiram a ruptura, de um modo geral apresentam escorregamentos que possuem formato similar ao de uma concha, o que levou ao desenvolvimento de métodos que consideram superfícies de rotura de forma circular. Dessa forma, a estabilidade de taludes pode ser avaliada através do equilíbrio de momentos em relação ao centro de superfície de rotura, sendo nulo o braço das forças normais a esta e constante o das forças de corte.

De acordo com Freitas (2010), trata-se, no entanto, de uma simplificação ao considerar a natureza do estudo sendo bidimensional, o que leva a resultados conservadores uma vez que somente a superfície de ruptura mais crítica é avaliada, sendo também desprezado o efeito tridimensional da resistência mobilizada nas extremidades laterais da superfície de deslizamento.

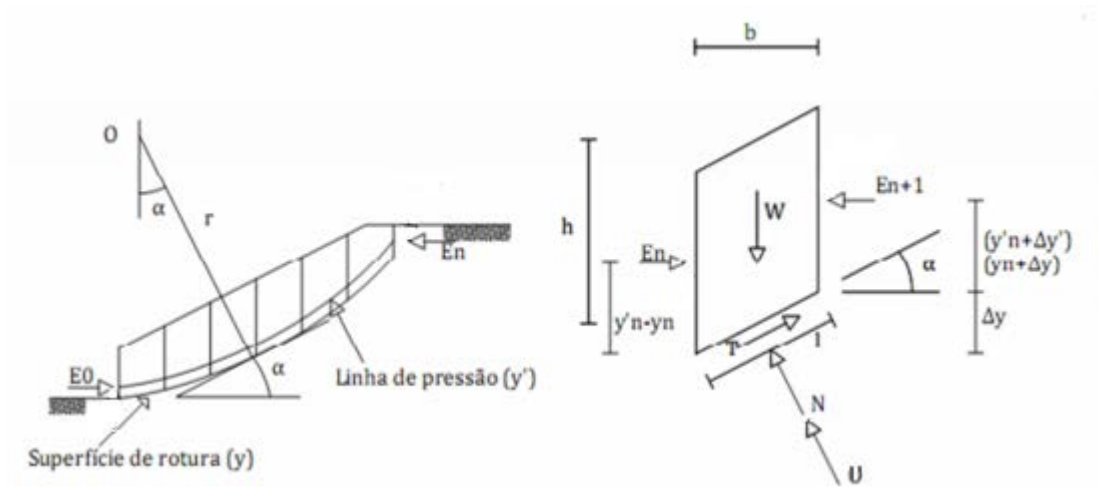
Existem diversas metodologias de cálculo de equilíbrio limite que partem do princípio de ruptura circular para determinação do Fator de Segurança na análise da estabilidade global, tais como o Método de Fellenius, Método de Spencer, Método de Bishop e Método de Bishop Simplificado.

3.7.1 Método de Bishop Simplificado

O Método de Bishop foi desenvolvido por Bishop em 1955. Segundo Freitas (2010), foi o primeiro método rigoroso a ser capaz de analisar superfícies de rotura circulares em solos friccionais e coesivos. Posteriormente, Bishop propôs o Método de Bishop Simplificado tratando-se de uma simplificação para o seu próprio método, a qual consiste em considerar que as forças de interação entre fatias são horizontais.

Tanto o Método de Bishop como o Método de Bishop Simplificado baseiam-se no método das fatias, no qual é verificado o equilíbrio completo em termos de forças verticais e momentos. As forças atuantes em cada lamela apresentam-se esquematizadas na Figura 3.5 a seguir.

Figura 3.5 - Método de Bishop Simplificado – Forças atuantes em uma fatia de solo.



Fonte: Adaptado de Freitas (2010)

Segundo Massad (2003), fazendo-se o somatório das forças verticais representadas na Figura 3.5 atuantes na lamela e igualando-o a zero para obter-se o equilíbrio das forças, tem-se:

$$(N + U) \cdot \cos \alpha + T \cdot \sin \alpha - W = 0 \quad (3.8)$$

Onde é sabido que,

$$U = u \cdot l \quad (3.9)$$

$$N = \sigma' \cdot l \quad (3.10)$$

$$T = \frac{1}{FS} \cdot (c' \cdot l + N \cdot \tan \alpha) \quad (3.11)$$

Assim, substituindo as expressões 3.9, 3.10 e 3.11 na equação 3.8, de acordo com Massad (2003), tem-se:

$$N = \frac{W - \frac{c' \cdot b \cdot \tan \alpha}{FS} - u \cdot b}{\cos \alpha + \frac{\tan \alpha \cdot \sin \alpha}{FS}} \quad (3.12)$$

É sabido que o Fator de Segurança pode ser obtido através da expressão 3.13 abaixo.

$$FS = \frac{\sum (c' \cdot l + N \cdot \tan \alpha)}{\sum (W \cdot \sin \alpha)} \quad (3.13)$$

O método de cálculo de Raithel e Kempfert (2000) considera as seguintes condições para o dimensionamento das colunas:

- recalques de mesma magnitude no topo das colunas e no solo mole do entorno;
- são negligenciados os recalques na camada de solo competente na qual as colunas de brita se assentam;
- condição de empuxo ativo $K_{a,c}$ na coluna;
- para o método de escavação, faz-se uso da condição de coeficiente de empuxo em repouso como sendo $K_{0,s} = 1 - \sin\phi$, enquanto que para o método do deslocamento é assumida a condição na qual o coeficiente de empuxo em repouso é majorado $K_{0,s}^*$;
- o geotêxtil possui comportamento linear elástico;
- o dimensionamento se dá para a condição drenada do solo, pois é nesta condição que se alcança valores máximos de recalques e forças de tração no geotêxtil.

De acordo com Raithel e Kempfert (2000), o equilíbrio entre o carregamento σ_0 e a componente da tensão vertical acima da coluna $\sigma_{v,c}$ e do solo mole $\sigma_{v,s}$ pode ser escrito como:

$$\Delta\sigma_0 \cdot A_E = \Delta\sigma_{v,c} \cdot A_c + \Delta\sigma_{v,s} \cdot (A_E - A_c) \quad (3.15)$$

A tensão vertical devido ao carregamento e os diferentes pesos de solo produzem uma tensão horizontal. $\sigma_{v,0,c}$ e $\sigma_{v,0,s}$ são as tensões verticais iniciais na coluna e no solo, respectivamente dadas por:

$$\Delta\sigma_{h,c} = \Delta\sigma_{v,c} \cdot K_{a,c} + \sigma_{v,0,c} \cdot K_{a,c} \quad (3.16)$$

$$\Delta\sigma_{h,s} = \Delta\sigma_{v,s} \cdot K_{a,s} + \sigma_{v,0,s} \cdot K_{0,s}^* \quad (3.17)$$

O coeficiente de empuxo ativo, segundo Rankine (1857), é dado pela expressão 3.18 a seguir.

$$K_{a,c} = \frac{1 - \sin\phi'_c}{1 + \sin\phi'_c} \quad (3.18)$$

O geossintético responsável pelo encamisamento (raio r_{geo}) possui um comportamento elástico-linear e módulo de rigidez J . O acréscimo de força no geossintético dado por:

$$T_{geo} = J \cdot \frac{\Delta r_{geo}}{r_{geo}} \quad (3.19)$$

Onde:

$$r_{geo} = \Delta r_{geo} + r_{geo,0} \quad (3.20)$$

A deformação máxima do geossintético é expressa pela equação 3.21 a seguir.

$$\varepsilon_{geo,max} = \frac{\Delta r_{geo}}{r_{geo}} \quad (3.21)$$

A força de tensão no geotêxtil pode ser transformada em uma tensão horizontal como representado na expressão 3.22 a seguir:

$$\Delta \sigma_{h,geo} = \frac{T_{geo}}{r_{geo}} \quad (3.22)$$

Segundo Ratheil e Kempfert (2000), pelo uso de tensões horizontais separadas uma diferença de tensões horizontais $\Delta \sigma_{h,diff}$ pode ser definida. Essa diferença de tensões resulta na mobilização parcial do empuxo passivo na camada de solo mole do entorno, sendo dada por:

$$\Delta \sigma_{h,diff} = \Delta \sigma_{h,c} - (\Delta \sigma_{h,s} + \Delta \sigma_{h,geo}) \quad (3.23)$$

A diferença de tensões resulta na expansão da coluna. A variação do raio da coluna (Δr_c) e o recalque na camada de solo mole s_s são calculados segundo abordagem proposta por Ghionna e Jamiolkowsky (1981) para um cilindro oco carregado radialmente e longitudinalmente (onde ν_s é o coeficiente de Poisson do solo mole).

$$\Delta r_c = \frac{\Delta \sigma_{h,diff}}{E^*} \cdot \left(\frac{1}{a_E} - 1 \right) \cdot r_c \quad (3.24)$$

$$s_s = \left(\frac{\Delta \sigma_{v,s}}{E_{oed,s}} - 2 \cdot \frac{1}{E^*} \cdot \frac{\nu_s}{1 - \nu_s} \cdot \Delta \sigma_{h,diff} \right) \cdot h \quad (3.25)$$

Sendo:

$$E^* = \left(\frac{1}{1 - \nu_s} + \frac{1}{1 + \nu_s} \cdot \frac{1}{a_E} \right) \cdot \frac{(1 + \nu_s) \cdot (1 - 2\nu_s)}{(1 - \nu_s)} \cdot E_{oed,s} \quad (3.26)$$

$$a_E = \frac{A_c}{A_E} \quad (3.27)$$

Sendo assumido um volume constante do material da coluna, pode-se escrever a equação 3.28 a seguir:

$$s_c = \left(1 - \frac{r_0^2}{(r_0 + \Delta r_c)^2}\right) \cdot h_0 \quad (3.28)$$

Usando a equação acima, de acordo com Raithel e Kempfert (2000), deve ser considerado que se trata somente de uma correlação geométrica. Ou seja, se o cálculo é realizado em vários incrementos de carga, a altura inicial h_0 e o raio inicial r_0 deve ser novamente calculado, em outras palavras pode-se usar: $r_0 = r_c$ e $h_0 = h_c$.

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}) segundo seguinte consideração:

$$\Delta r_c = \Delta r_{geo} + (r_{geo} - r_c) \quad (3.29)$$

Como o recalque da coluna é igual ao do solo mole ($s_c = s_s$), finalmente, pode-se obter a equação 3.30 a seguir:

$$\left\{ \frac{\Delta \sigma_{v,s}}{E_{oed,s}} - \frac{2}{E^*} \cdot \frac{v_s}{1-v_s} \left[K_{a,c} \cdot \left(\frac{1}{a_E} \cdot \Delta \sigma_0 - \frac{1-a_E}{a_E} \cdot \Delta \sigma_{v,s} + \sigma_{v,0,c} \right) - K_{0,s} \cdot \Delta \sigma_{v,s} - K_{0,s}^* \cdot \sigma_{v,0,s} + \frac{(r_{geo} - r_c) \cdot J}{r_{geo}^2} - \frac{\Delta r_c \cdot J}{r_{geo}^2} \right] \right\} \cdot h = \left[1 - \frac{r_c^2}{(r_c + \Delta r_c)^2} \right] \cdot h \quad (3.30)$$

Sendo:

$$\Delta r_c = \frac{K_{a,c} \cdot \left(\frac{1}{a_E} \cdot \sigma_0 - \frac{1-a_E}{a_E} \cdot \Delta \sigma_{v,s} + \sigma_{v,0,c} \right) - K_{0,s} \cdot \Delta \sigma_{v,s} - K_{0,s}^* \cdot \sigma_{v,0,s} + \frac{(r_{geo} - r_c) \cdot J}{r_{geo}^2}}{\frac{E^*}{\left(\frac{1}{a_E} - 1 \right) \cdot r_c} + \frac{J}{r_{geo}^2}} \quad (3.31)$$

Inserindo o Δr_c da equação 3.31 na equação 3.30 apenas resta ser determinada a incógnita $\Delta \sigma_{v,s}$. A equação 3.30 pode ser solucionada através de um processo iterativo. O módulo edométrico do solo mole $E_{oed,s}$ pode ser determinado de forma realista, dependendo da tensão existente p^* . A equação a seguir pode ser usada, onde $E_{oed,s,ref}$ é o módulo edométrico de referência para uma tensão de referência p_{ref} . Segundo Schad (1979), um termo extra de coesão ($c' \cdot \cot \phi'$) pode ser adicionado à p^* .

$$E_{oed,s} = E_{oed,s,ref} \cdot \left(\frac{p^*}{p_{ref}} \right)^e \quad (3.32)$$

3.9 REPRESENTAÇÃO DAS COLUNAS NAS METODOLOGIAS DE CÁLCULO PARA ANÁLISE DA ESTABILIDADE GLOBAL PARA O SISTEMA GEC

Existem diversas metodologias para representação das colunas granulares encamisadas no modelo para análise da estabilidade global. Neste trabalho, serão apresentadas apenas quatro metodologias propostas por Priebe e Raithel que se encontram detalhadas nos tópicos de 3.9.1 a 3.9.4 a seguir.

3.9.1 Representação das colunas pelo método de Priebe considerando área equivalente

O método de representação das colunas granulares proposto por Priebe (1995) não considera a existência do encamisamento geotêxtil, como se o sistema fosse de colunas granulares convencionais, sendo, portanto, a favor da segurança.

Essa metodologia considera o conjunto solo-colunas como sendo um único solo homogêneo com parâmetros de resistência c'_m e ϕ'_m e peso específico ponderado do conjunto γ_m .

A coluna granular recebe uma parcela maior da carga total proveniente ao aterro e possíveis sobrecargas em relação ao solo mole, graças ao arqueamento do solo. Assim, Priebe desenvolveu a fórmula a seguir para determinar o fator de concentração de tensões na coluna (m).

$$m = \frac{n-1+a_E}{n} \quad (3.33)$$

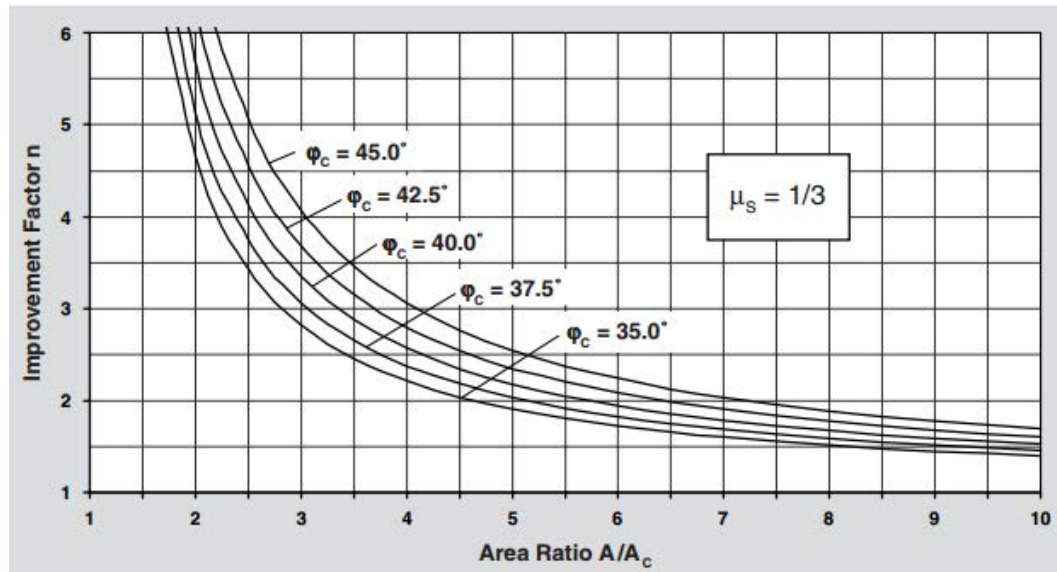
Para simplificar, Priebe recomendou que se desprezasse a redução do volume do solo mole do entorno causada pelo “embarrigamento” da coluna.

Para uma taxa de cobertura de valor elevado, é calculada uma parcela de carga sobre o material de preenchimento da coluna maior do que realmente atua. Desse modo, para não se superestimar a resistência ao cisalhamento desse material, a porção do carregamento sobre as colunas deve ser reduzido. Assim, a expressão a seguir 3.34 torna-se mais adequada.

$$m^* = \frac{n-1}{n} \quad (3.34)$$

O fator de melhoria (n) que compõe as equações 3.33 e 3.34 pode ser obtido através do ábaco da Figura 3.7.

Figura 3.7 - Ábaco para obtenção do fator de melhoria a partir da taxa de cobertura para coeficiente de Poisson de 0,33.



Fonte: Priebe (1995)

O ângulo de atrito (ϕ'_m) e a coesão (c'_m) do solo equivalente são obtidos através das equações 3.35 e 3.36 a seguir.

$$\tan \phi'_m = m^* \cdot \tan \phi'_c + (1 - m^*) \cdot \tan \phi'_s \quad (3.35)$$

$$c'_m = (1 - a_E) \cdot c'_s \quad (3.36)$$

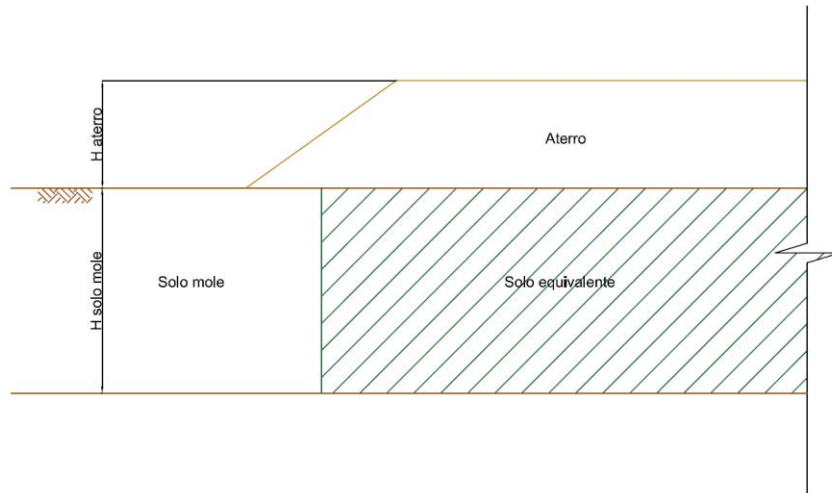
Contudo, a instalação da coluna granular pode amolgar o solo mole do entorno. Por razões de segurança, Priebe (1995) recomenda considerar a coesão proporcional ao carregamento de modo a reduzi-la, ou seja, essa proposta não é baseada na mecânica dos solos. Dessa maneira, a coesão do solo equivalente pode ser representada conforme a equação 3.37 a seguir.

$$c_m^* = (1 - m^*) \cdot c'_s \quad (3.37)$$

Segundo Almeida e Marques (2010), Priebe determinou a expressão a seguir para se obter o valor do peso específico (γ_m) equivalente do conjunto solo-coluna como sendo a média ponderada dos pesos específicos dos solos que compõem o conjunto.

$$\gamma_m = \gamma_c \cdot a_E + \gamma_s \cdot (1 - a_E) \quad (3.38)$$

Figura 3.8 - Modelo de Priebe (1995) considerando área equivalente.

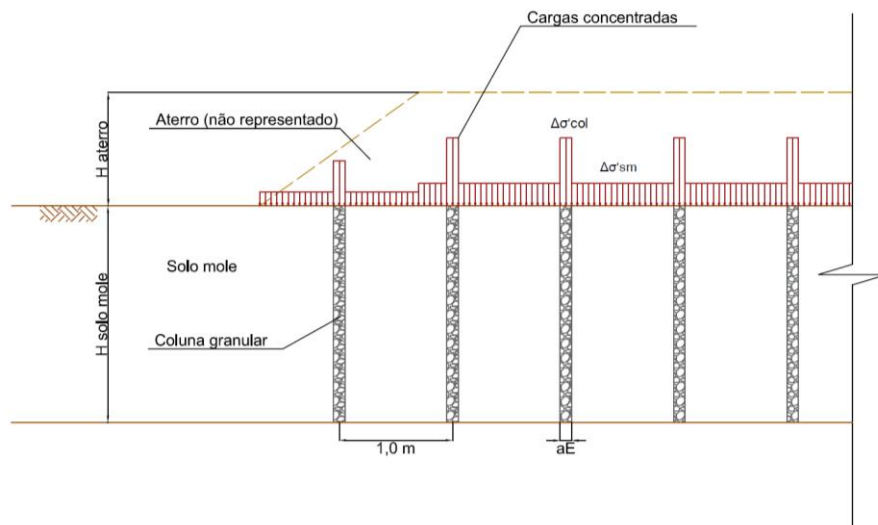


Fonte: Produção do próprio autor

3.9.2 Representação das colunas pelo método adaptado de Priebe considerando modelo das cargas concentradas

Segundo proposta apresentada por Araújo, Schmidt e Brugger (2016), adaptada da metodologia de Priebe (1995), o conjunto solo-colunas no modelo para análise da estabilidade global pode ser representado por colunas com diâmetro de valor igual à taxa de cobertura (a_E) e com espaçamento entre seus eixos igual a 1 m, pelo fato de o *software* utilizado, Slide 6.0, realizar as análise em apenas duas dimensões. O aterro e as sobrecargas são representados através de cargas distribuídas com maior magnitude sobre as colunas e menor sobre o solo mole, devido à concentração de carga em seu topo pelo efeito do arqueamento. Dessa forma, o modelo segue a configuração do esquema representado na Figura 3.9 a seguir.

Figura 3.9 - Modelo das cargas concentradas adaptado de Priebe (1995).

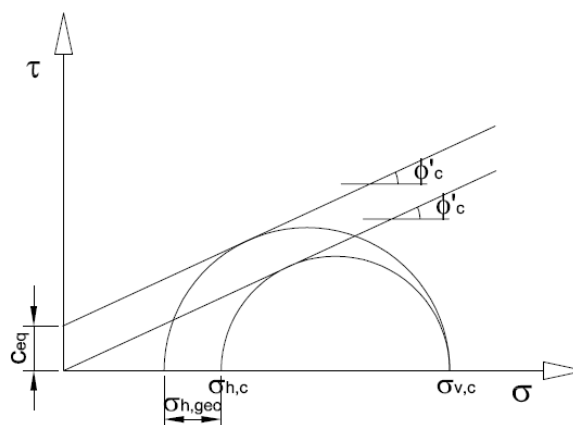


Fonte: Produção do próprio autor

3.9.3 Representação das colunas pelo modelo da coesão equivalente proposto por Raithel

Raithel (1999) propõe que a força de confinamento aplicada no material de preenchimento da coluna devido ao encamisamento geossintético pode ser representada por uma coesão equivalente fictícia do material granular, aumentando sua resistência ao cisalhamento, enquanto que os demais parâmetros permanecem inalterados.

Figura 3.10 - Representação do ganho de resistência, através do Círculo de Mohr, por consideração proposta por Raithel (1999) de uma coesão equivalente do material da coluna devido ao encamisamento.



Fonte: Produção do próprio autor

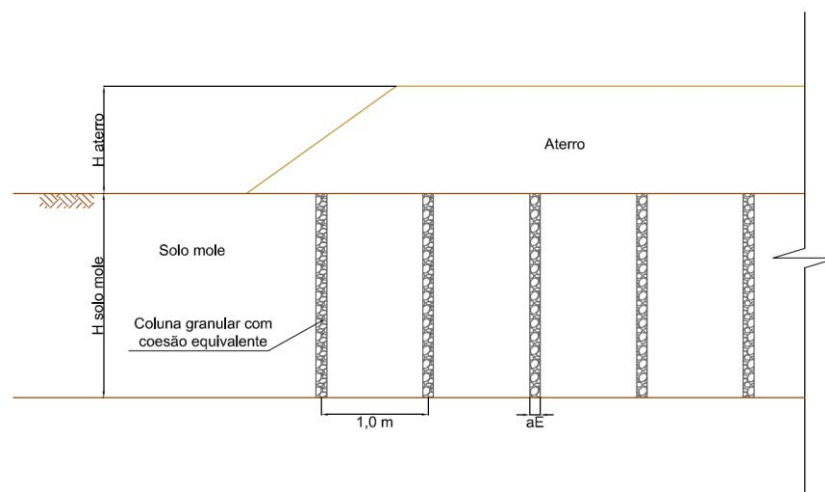
A fórmula para obtenção da coesão equivalente encontra-se na expressão 3.39 a seguir.

$$c_{eq} = \frac{T_{geo}}{r_{geo}} \cdot \frac{1 + \sin \varphi'_c}{2 \cdot \cos \varphi'_c} \quad (3.39)$$

O *software* RingtracS, utilizado para o dimensionamento do geotêxtil nesse trabalho, também gera em sua saída o valor da coesão equivalente proposta por Raithel expressa na equação 3.39.

Da mesma forma que o Modelo das Cargas Concentradas visto anteriormente, esse método também será analisado em duas dimensões por ser realizado pelo *software* Slide 6.0, desse modo, pode-se considerar a representação das colunas no modelo para análise com diâmetro de valor igual à taxa de cobertura (a_E) e com espaçamento entre seus eixos igual a 1 m.

Figura 3.11 - Modelo da coesão equivalente proposto por Raithel (1999).

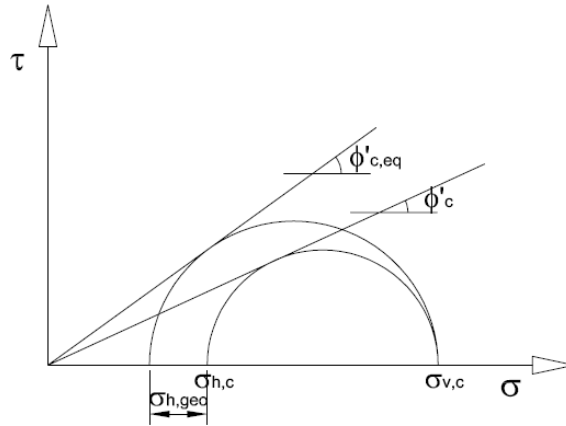


Fonte: Produção do próprio autor

3.9.4 Representação das colunas pelo modelo do ângulo de atrito interno efetivo equivalente proposto por Raithel

De acordo com Raithel (1999), o ganho de resistência nas colunas devido à elevada rigidez do encamisamento pode ser representado por um ângulo de atrito interno efetivo equivalente fictício do material granular.

Figura 3.13 - Representação do ganho de resistência, através do Círculo de Mohr, por consideração proposta por Raithel (1999) de um ângulo de atrito interno efetivo equivalente do material da coluna devido ao encamisamento.



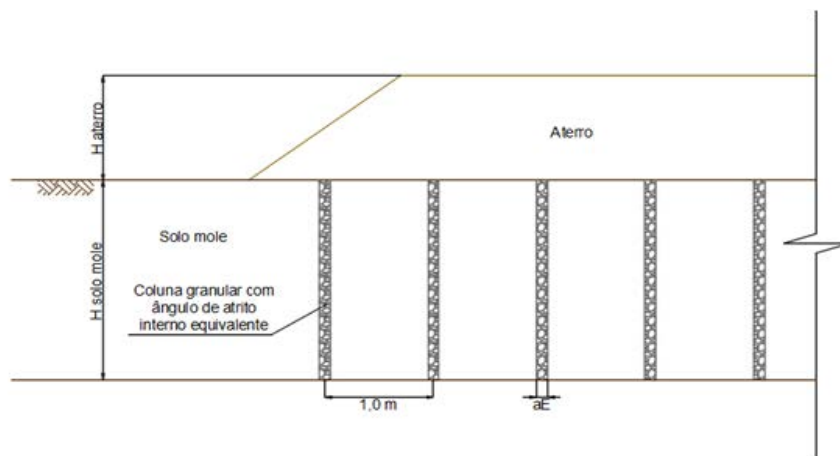
Fonte: Produção do próprio autor

Segundo Raithel (1999), o ângulo de atrito interno efetivo equivalente é dado por:

$$\text{sen } \varphi'_{c,eq} = \frac{\frac{1+\text{sen}\varphi'_c}{1-\text{sen}\varphi'_c} + \frac{\Delta\sigma_{h,geo}}{\Delta\sigma_{h,c}} - 1}{\frac{1+\text{sen}\varphi'_c}{1-\text{sen}\varphi'_c} - \frac{\Delta\sigma_{h,geo}}{\Delta\sigma_{h,c}} + 1} \quad (3.40)$$

Essa metodologia será aplicada à verificação da análise de estabilidade por elementos finitos através do *software* PLAXIS 2D. Como o *software* faz a análise em apenas duas dimensões, as colunas representadas no modelo podem ser representadas com diâmetro de valor igual à taxa de cobertura (a_E) e espaçamento entre seus eixos igual a 1 m.

Figura 3.12 – Modelo do ângulo de atrito interno efetivo equivalente proposto por Raithel (1999).



Fonte: Produção do próprio autor

3.10 SOFTWARES USADOS PARA REALIZAÇÃO DAS ANÁLISES

3.10.1 RingtracS

O RingtracS é um programa de dimensionamento estrutural de colunas granulares encamisadas com geotêxteis desenvolvido pela Huesker GmbH na Alemanha. Essa ferramenta de cálculo auxilia no desenvolvimento de projetos com a utilização especificamente de colunas Ringtrac®.

A metodologia de cálculo utilizada pelo RingtracS foi desenvolvida por Raithel e Kempfert (2000) e se encontra descrita no item 3.8 deste trabalho.

Através dos parâmetros de projeto que são inseridos pelo usuário, o *software* calcula as tensões que atuam no topo da coluna e na camada de solo mole devido ao carregamento. Também é estimado o valor do recalque do solo mole e as condições de deformação do geotêxtil.

Assim, o *software* permite identificar qual o espaçamento da malha de colunas e o tipo de geotêxtil Ringtrac® para seu reforço de forma a resistir às cargas verticais que atuam sobre as colunas segundo a configuração mais interessante, técnica e economicamente.

3.10.2 Slide 6.0

Slide 6.0 é um *software* desenvolvido pelo grupo Rocscience para análise de estabilidade de taludes que tem como saída o Fator de Segurança e tensão-deformação. Essa ferramenta permite a verificação das diversas condições do solo e geometria do talude. Algoritmos de busca avançada simplificam a tarefa de encontrar a superfície de deslizamento crítico com o menor Fator de Segurança.

São atribuídos os parâmetros de entrada pelo usuário, incluindo propriedades do material, propriedades de apoio, cargas e localização do lençol freático. O *software* permite que a análise seja feita de acordo com a metodologia de Bishop, Bishop Simplificado, Spencer, entre outros.

3.10.3 PLAXIS 2D

PLAXIS 2D é um programa de elementos finitos desenvolvido inicialmente em 1987 pela Universidade Técnica de Delft (Holanda) para aplicações em problemas de engenharia geotécnica e, mais tarde em 1993, sucedida pela atual empresa comercial PLAXIS.

De acordo com Brinkgreve (2002), o programa é específico para análises de deformações e estabilidade de modelos de estruturas geotécnicas. Atualmente, o PLAXIS traz implementadas as seguintes leis constitutivas para materiais geotécnicos: elasticidade linear, modelo de Mohr–Coulomb, modelo elasto-plástico com endurecimento isotrópico (Hard Soil Model, também conhecido como modelo PLAXIS), modelo elasto-plástico com amolecimento (Soft Soil Model) e modelo constitutivo para problemas com dependência no tempo (creep).

Segundo Santos (2007), o PLAXIS funciona em ambiente Windows, sendo sua estrutura dividida em quatro sub-programas: entrada de dados (Input), cálculo (Calculation), saída de dados (Output) e geração de curvas para pontos selecionados da malha (Curves).

3.10.3.1 Entrada de dados (Input)

Segundo Brinkgreve (2002), no Input são introduzidos os dados do modelo: geometria, disposição dos elementos, propriedades dos materiais constituintes, modelo de comportamento do solo e as condições de contorno.

De acordo com Santos (2007), a geração da malha de elementos finitos é automática, no qual a geometria é dividida em elementos triangulares isoparamétricos de seis ou quinze nós. Os elementos de seis nós apresentam relações de interpolação de segunda ordem para deslocamentos, sendo a matriz de rigidez avaliada por integração numérica, a partir de três pontos de Gauss. Já para elementos de 15 nós, a interpolação é de quarta ordem e a integração numérica se dá a partir de 12 pontos de Gauss. Como precisão dos resultados depende da configuração da malha de elementos finitos, o programa permite refinamento da malha em pontos de interesse.

Ainda no Input são definidos os modelos constitutivos dos materiais empregados como o elástico linear, Mohr-Coulomb, *Hardening Soil*, entre outros.

3.10.3.2 Cálculo (Calculation)

Segundo Brinkgreve (2002), o programa realiza os cálculos de elementos finitos considerando apenas a análise de deformações, podendo-se assumir três análises distintas: plástica (Plastic), de adensamento (Consolidation Analysis) e de determinação do Fator de Segurança (Phi-c Reduction). De acordo com Santos (2007), na análise para determinação do Fator de Segurança, o PLAXIS compara a resistência ao cisalhamento do solo em um determinado ponto e direção com as tensões cisalhantes mobilizadas neste ponto. O processo de cálculo é dividido em estágios para simulação de etapas de carregamentos que ocorrem na prática.

3.10.3.3 Saída de resultados (Output)

Segundo Santos (2007), o Output do PLAXIS apresenta os deslocamentos e as deformações nos nós e as tensões nos pontos de Gauss para cada estágio de cálculo.

3.10.3.4 Saída Gráfica (Curves)

De acordo com Santos (2007), o Curves permite a geração de curvas como tensão x deformação, tempo x deslocamento, carga x deslocamento, Fator de Segurança x deformação para pontos selecionados da malha.

3.11 CASOS DE OBRAS

3.11.1 Hamburgo

O caso mais conhecido de implantação do sistema de Colunas Ringtrac® foi em Hamburgo para expansão da unidade alemã da fábrica da Airbus.

Para a implantação da linha de fabricação do A380, aeronave para até 600 passageiros foi aterrada uma área de 140ha do leito do Rio Elba adjacente às instalações existentes. Os diques externos de contenção do aterro hidráulico, com extensão de 2,4km, foram fundados sobre aproximadamente 60.000 colunas Ringtrac, com até 14m de comprimento. Os aterros dos diques deveriam alcançar 9m de altura acima do leito do rio, composto por argila mole com resistência não-drenada variando de 2 a 10kPa em 11m de espessura, em média (SILVA; SCHMIDT; ANDRADE, 2008).

Figura 3.14 - Instalação das colunas Ringtrac®.



Fonte: Silva, Schmidt e Andrade (2008)

O uso de colunas encamisadas com geossintético proporcionou grande economia para a obra: reduziu o volume de aterro necessário para a construção dos diques (equivalente a sete metros de altura) e reduziu também o prazo de execução da obra em nove meses.

3.11.2 Brasil

De acordo com Silva, Schmidt e Andrade (2008), o projeto pioneiro que utilizou o sistema de Colunas Rintrac® no Brasil foi em 2006, na segunda etapa da interligação entre as rodovias Dutra e Carvalho Pinto, no município de São José dos Campos (SP).

A obra se localizava em uma área adjacente a uma lagoa, sobre solo com baixa capacidade de suporte que possuía resistência não drenada inferior a 15 kPa.

As Colunas Ringtrac® foram utilizadas em malha triangular com espaçamento variando de 1,85 a 2,20m totalizando cerca de 1800 colunas. O reforço utilizado era produzido com filamentos de PVA de alto módulo de rigidez (2000 kN/m de módulo de rigidez nominal na direção perimetral).

Para otimizar ainda mais a solução, foram instaladas geogrelhas com resistência à tração nominal de 300 a 500 kN/m sobre o colchão de areia de nivelamento do topo das colunas.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O dimensionamento do geotêxtil que encamisa as colunas será realizado através do *software* RingtracS, que utiliza a metodologia proposta por Raithel e Kempfert (2000) descrita no item 3.8.

Para o cálculo do Fator de Segurança (FS) das análises da estabilidade global do sistema GEC será utilizado o Método de Bishop Simplificado calculado através do *software* Slide 6.0 para se verificar a estabilidade pelas metodologias de Priebe (1995) considerando área equivalente, de Priebe (1995) adaptada considerando concentração de cargas e de Raithel (1999) considerando coesão equivalente das colunas, conforme indicações do item 3.9.

Já para o cálculo do FS obtido por método de elementos finitos será utilizado o *software* PLAXIS 2D. Para representação das colunas no modelo, adotou-se a metodologia proposta de Raithel (1999) considerando ângulo de atrito efetivo equivalente, de modo a utilizar a mesma representação adotada por Babaei (2015) em suas análises por elementos finitos.

Apresentar-se-ão casos para serem analisados pelas quatro metodologias de cálculo apresentadas nesse trabalho para representação das colunas no modelo para análise de estabilidade global.

Será analisado, primeiramente, um caso denominado Caso Modelo que possui os parâmetros base para os demais casos: Caso Solo Mole, Caso Material Preenchimento e Caso Taxa Cobertura. Estes se distinguirão do Caso Modelo por determinadas características:

- O Caso Solo Mole se difere do Caso Modelo pelos parâmetros do solo mole;
- O Caso Material Preenchimento se difere do Caso Modelo pelos parâmetros do material de preenchimento da coluna;
- O Caso Taxa Cobertura se difere do Caso Modelo pela taxa de cobertura das colunas.

Para cada um dos casos provindos do Caso Modelo serão realizados três estudos: Estudo A, Estudo B e Estudo C. Os Estudos A e B apresentam os valores dos parâmetros alterados para cada caso com menor e maior magnitude, respectivamente, em relação ao Caso Modelo, nos quais são dimensionados geotêxteis com o menor módulo de rigidez possível. Para o Estudo C, será adotado:

- o mesmo geotêxtil que o dimensionado para o Estudo A, pois o Estudo A possui parâmetros inferiores em relação ao B de modo a ser necessário um geotêxtil de maior módulo de rigidez;
- os mesmos parâmetro do Estudo B.

Dessa forma, torna-se possível fazer comparações entre os resultados obtidos pelos Estudos A e C para uma mesma metodologia por não variar o geotêxtil e, assim, não sofrer sua influência nos resultados de estabilidade. Desse modo, é avaliado o comportamento de cada metodologia de representação das colunas com as variações paramétricas.

Além disso, para o Caso Material de Preenchimento, serão analisados preenchimentos com areia e com brita para todos os Estudos, para verificar a influência do material nos resultados do dimensionamento do geotêxtil e na estabilidade global.

Como o objetivo da realização das análises é apenas comparar os resultados obtidos através de cada representação de colunas, não será estabelecido um FS mínimo a ser atingido para a estabilidade (como em projetos reais), pois envolveria o uso de geogrelha no topo das colunas para aumentar a estabilidade das análises que apresentarem Fatores de Segurança baixos. As análises são meramente didáticas.

Para o dimensionamento do geotêxtil, foram consideradas as seguintes características para todos os casos a serem analisados:

- malha de colunas triangular;
- nível d'água igual ao nível do terreno;
- instalação das colunas pelo método de deslocamento;
- geotêxtil de PVA;
- período de projeto de 120 anos;
- solo com pH neutro;
- fatores de segurança parciais:
 - devido ao carregamento permanente: 1,30;
 - devido ao carregamento acidental desfavorável: 1,30;
 - devido à flexibilidade do reforço: 1,10;
 - devido ao ajuste recomendado pelo EBGeo: 1,00;
 - devido à coesão equivalente: 1,00.

4.1 CASO MODELO

Os parâmetros adotados para o Caso Modelo para realização das análises seguem os valores apresentados nas tabelas a seguir.

Tabela 4.1 - Parâmetros das colunas adotados para o Caso Modelo.

Parâmetro	Símbolo	Valor/Tipo	Unidade
Taxa de cobertura	a_E	15	%
Diâmetro	d_c	0,8	m
Ângulo de atrito interno efetivo do preenchimento	φ'_c	34	°
Peso específico do preenchimento	γ_c	20	kN/m ³
Material de preenchimento	-	Brita	-

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 4.2 - Parâmetros do aterro e valor da sobrecarga operacional adotados para o Caso Modelo.

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Altura	h	5	m
Comprimento da crista do aterro	L	20	m
Ângulo de atrito interno efetivo do solo	φ'_{at}	30	°
Coesão efetiva do solo	c'_{at}	20	kPa
Peso específico do solo	γ_{at}	19	kN/m ³
Inclinação do talude	β	33,7	°
Sobrecarga operacional prevista	q	50	kPa

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 4.3 - Parâmetros do solo mole adotados para o Caso Modelo.

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Ângulo de atrito interno efetivo	φ'_s	24	°
Coesão efetiva	c'_s	2	kPa
Peso específico	γ_s	16	kN/m ³
Espessura da camada	h_s	10	m
Módulo edométrico	$E_{oed,s}$	1500	kPa
Pressão de referência	p_{ref}	50	kPa
Coeficiente de Poisson	ν_s	0,33	-
Resistência não drenada	S_u	15	kPa

Fonte: Produção do próprio autor

4.2 CASO SOLO MOLE

Como já citado, o Caso Solo Mole se difere do Caso Modelo apresentado anteriormente pelos parâmetros do solo mole. Os valores adotados para o Estudo A e Estudo B são apresentados na Tabela 4.4 a seguir.

Tabela 4.4 - Parâmetros do solo mole adotados para o Caso Solo Mole.

Parâmetro	Símbolo	Valor Estudo A	Valor Estudo B	Unidade
Ângulo de atrito interno efetivo	φ'_s	18	30	°
Coesão efetiva	c'_s	0,5	3,5	kPa
Peso específico	γ_s	16	16	kN/m ³
Espessura da camada	h_s	10	10	m
Módulo edométrico	$E_{oed,s}$	800	2200	kPa
Pressão de referência	p_{ref}	50	50	kPa
Coefficiente de Poisson	ν_s	0,33	0,33	-
Resistência não drenada	S_u	5	25	kPa

Fonte: Produção do próprio autor

4.3 CASO MATERIAL PREENCHIMENTO

Como já citado, o Caso Material Preenchimento se difere do Caso Modelo apresentado anteriormente pelos parâmetros do material de preenchimento das colunas granulares. Os valores adotados para o Estudo A e Estudo B são apresentados na Tabela 4.5 a seguir.

Tabela 4.5 - Parâmetros das colunas adotados para o Caso Material Preenchimento.

Parâmetro	Símbolo	Valor Estudo A	Valor Estudo A	Valor Estudo B	Valor Estudo B	Unidade
Taxa de cobertura	a_E	15	15	15	15	%
Diâmetro	d_c	0,8	0,8	0,8	0,8	m
Ângulo de atrito interno efetivo	φ'_c	28	28	40	40	°
Peso específico do preenchimento	γ_c	20	20	20	20	kN/m ³
Material de preenchimento	-	Areia	Brita	Areia	Brita	-

Fonte: Produção do próprio autor

4.4 CASO TAXA COBERTURA

Como já citado, o Caso Taxa Cobertura se difere do Caso Modelo apresentado anteriormente apenas pelo valor da taxa de cobertura. Os valores adotados para o Estudo A e para o Estudo B são apresentados na Tabela 4.6 a seguir.

Tabela 4.6 – Valores das taxas de cobertura adotados para o Caso Taxa Cobertura.

Parâmetro	Símbolo	Valor Estudo A	Valor Estudo B	Unidade
Taxa de cobertura	a_E	10	20	%

Fonte: Produção do próprio autor

5 ANÁLISES E RESULTADOS

5.1 CASO MODELO

5.1.1 Dimensionamento do geotêxtil

Fazendo-se uso do *software* RingtracS, primeiramente, foi possível determinar a resistência disponível do geotêxtil mínima necessária, ou seja, quando esta atingia valor maior ou igual à força mobilizada no encamisamento. Dentre outros resultados, o *software* gera em sua saída a magnitude das tensões atuantes no topo das colunas ($\sigma_{v,c}$) e no topo do solo mole ($\sigma_{v,s}$), como pode ser visto na figura a seguir.

Figura 5.1 - Resultados do dimensionamento do geotêxtil para o Caso Modelo no *software* RingtracS.

Result for 100/300 PM area ratio 15%		
Number of analysed slices	20	
Axial spacing in triangular pattern	1.97 m	
Design value of mobilized ring force	112.99 kN/m	
Available design strength in ring direction	139.15 kN/m	
Degree of use (1/f)	0.81	
Dead load steps Total load steps Print Report		
	Dead loads	Total loads
Pressure on top of columns	568.45 kN/m ²	843.06 kN/m ²
Pressure on top of soft soil	11.45 kN/m ²	21.81 kN/m ²
Efficiency of columns	0.90	0.87
Load on column top	285.73 kN	423.77 kN
Total settlement	0.21 m	0.30 m
Maximum ring strain	1.70 %	2.47 %
Mobilized ring force	59.88 kN/m	86.91 kN/m
Added embankment height	0.00 m	0.00 m
Equivalent cohesion	140.78 kN/m ²	204.33 kN/m ²

Fonte: Produção do próprio autor

A partir da figura, para o Caso Modelo, observa-se que:

- A resistência disponível na direção perimetral do geotêxtil vale 139,15 kN/m sendo superior à força mobilizada no encamisamento que apresenta resultado igual a 112,99 kN/m, portanto este geotêxtil resiste às solicitações, sendo o de menor resistência possível para o caso (maior economia);
- O geotêxtil Ringtrac 100/300 PM adotado apresenta módulo de rigidez nominal igual a 4900 kN/m, resistência à tração nominal igual a 100 kN/m na direção

longitudinal e igual a 300 kN/m na direção perimetral e deformação na resistência nominal de 6% no sentido transversal;

- As tensões atuantes no topo das colunas ($\sigma_{v,c}$) foram de 843,06 kN/m², enquanto que as atuantes no topo do solo mole ($\sigma_{v,s}$) apresentam valor igual a 21,81 kN/m², resultando em uma eficiência das colunas de 87%;
- O dimensionamento indicou deformação máxima no reforço ($\epsilon_{geo,max}$) de 2,47%;
- A tração mobilizada no reforço geossintético (T_{geo}) foi de 86,91 kN/m, resultando em uma coesão equivalente pelo método de Raithel (c_{eq}) igual a 204,33 kN/m².

5.1.2 Análises de estabilidade global

5.1.2.1 Representação das colunas pelo método de Priebe considerando área equivalente

Pelo ábaco da Figura 3.7, o fator de melhoria (n) tem valor igual a 1,65 para os parâmetros adotados. Dessa forma, torna-se possível calcular o fator reduzido de concentração de tensões na coluna (recomendado).

$$m^* = \frac{n - 1}{n} = \frac{1,65 - 1}{1,65}$$

$$m^* = 0,39$$

Com esse fator, obtêm-se os parâmetros do solo equivalente:

$$\tan \varphi'_m = m^* \cdot \tan \varphi'_c + (1 - m^*) \cdot \tan \varphi'_s = 0,39 \cdot \tan 34^\circ + (1 - 0,39) \cdot \tan 24^\circ$$

$$\varphi'_m = 28,1^\circ$$

$$c'_m = (1 - m^*) \cdot c'_s = (1 - 0,39) \cdot 2$$

$$c'_m = 1,22 \text{ kPa}$$

$$\gamma_m = \gamma_c \cdot a_E + \gamma_s \cdot (1 - a_E) = 20 \cdot 0,15 + 16 \cdot (1 - 0,15)$$

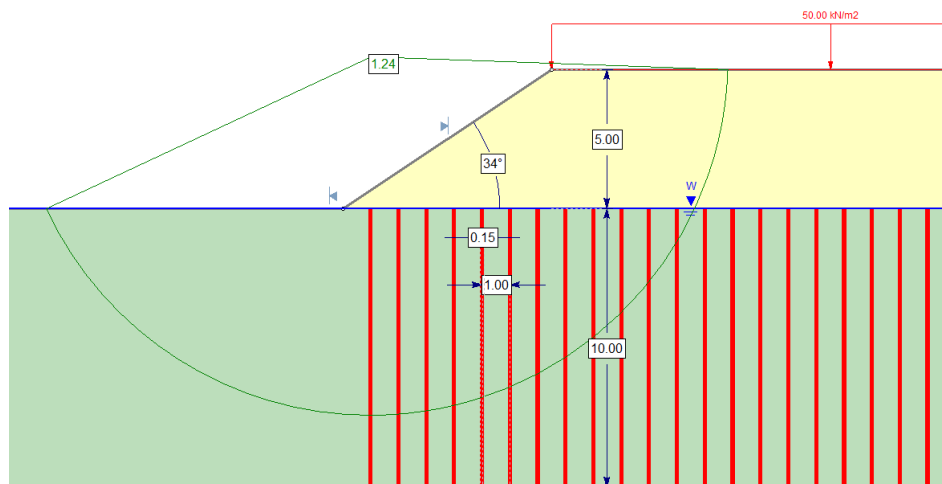
$$\gamma_m = 16,6 \text{ kN/m}^3$$

5.1.2.3 Representação das colunas pelo modelo da coesão equivalente proposto por Raithel

A coesão equivalente proposta por Raithel pode ser obtida diretamente do *software* RingtracS mostrada na Figura 5.1, onde pode ser visto que tem magnitude igual a 204,33 kN/m².

Figura 5.4 - Análise da estabilidade global do Caso Modelo pelo método de Raithel considerando coesão equivalente.

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Cohesion Type	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Aterro		19	Mohr-Coulomb	20	30		Water Surface	Custom	1	
Solo Mole		16	Undrained	15		Constant	None			0
Coluna Granular com Coesão Equivalente		20	Mohr-Coulomb	204.33	34		Water Surface	Custom	1	



Fonte: Produção do próprio autor

5.1.2.4 Representação das colunas pelo modelo do ângulo de atrito interno efetivo equivalente proposto por Raithel

Primeiramente, calcula-se o coeficiente de empuxo ativo:

$$K_{a,c} = \frac{1 - \sin \varphi'_c}{1 + \sin \varphi'_c} = \frac{1 - \sin 34^\circ}{1 + \sin 34^\circ}$$

$$K_{a,c} = 0,28$$

Considerando um ponto no meio da camada de argila e adotando o valor do acréscimo de tensão vertical sobre a coluna obtido com o resultado do *software* RingtracS, calcula-se o acréscimo da tensão horizontal atuante nas colunas:

$$\Delta\sigma_{h,c} = \Delta\sigma_{v,c} \cdot K_{a,c} + \sigma_{v,0,c} \cdot K_{a,c} = 843,06 \cdot 0,28 + \left(\frac{1}{2} \cdot 20 \cdot 10\right) \cdot 0,28$$

$$\Delta\sigma_{h,c} = 264,06 \text{ kN/m}$$

Sendo o raio do geossintético e sua deformação máxima dados, respectivamente, por:

$$r_{\text{geo}} = \Delta r_{\text{geo}} + r_{\text{geo},0}$$

$$\varepsilon_{\text{geo,max}} = \frac{\Delta r_{\text{geo}}}{r_{\text{geo}}}$$

tem-se o valor do raio do geossintético a partir do valor da deformação máxima do geossintético obtido com o resultado do *software* RingtracS :

$$r_{\text{geo}} = \frac{r_{\text{geo},0}}{1 - \varepsilon_{\text{geo,max}}} = \frac{0,40}{1 - 0,0247}$$

$$r_{\text{geo}} = 0,4101 \text{ m}$$

A partir do valor do raio do geossintético e da força mobilizada nele obtida pelo *software* RingtracS, calcula-se a tensão horizontal no geossintético:

$$\Delta\sigma_{h,\text{geo}} = \frac{T_{\text{geo}}}{r_{\text{geo}}} = \frac{86,91}{0,4101}$$

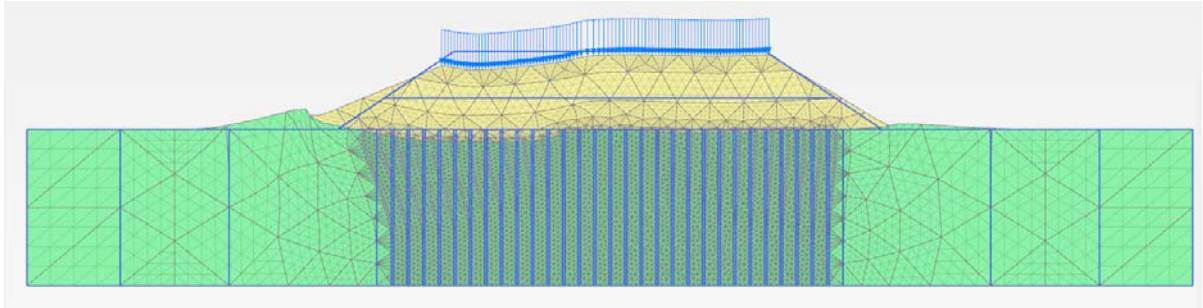
$$\Delta\sigma_{h,\text{geo}} = 211,91 \text{ kN/m}$$

Finalmente, torna-se possível calcular o ângulo de atrito interno efetivo equivalente:

$$\text{sen } \varphi'_{c,\text{eq}} = \frac{\frac{1 + \text{sen } \varphi'_c + \frac{\Delta\sigma_{h,\text{geo}}}{\Delta\sigma_{h,c}} - 1}{1 - \text{sen } \varphi'_c - \frac{\Delta\sigma_{h,\text{geo}}}{\Delta\sigma_{h,c}} + 1}}{\frac{1 + \text{sen } 34^\circ + \frac{211,97}{264,06} - 1}{1 - \text{sen } 34^\circ - \frac{211,97}{264,06} + 1}} = \frac{1 + \text{sen } 34^\circ + \frac{211,97}{264,06} - 1}{1 - \text{sen } 34^\circ - \frac{211,97}{264,06} + 1}$$

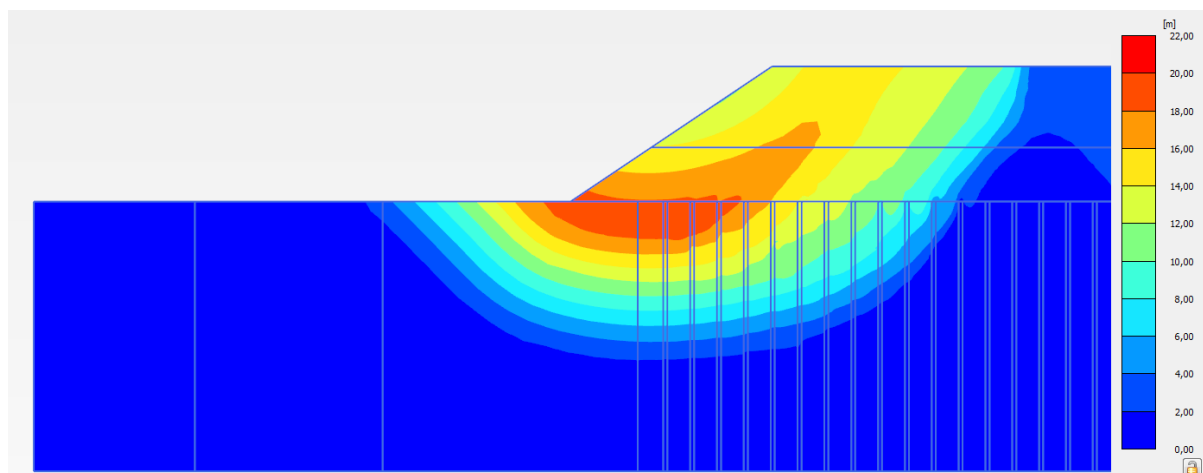
$$\varphi'_{c,\text{eq}} = 63,5^\circ$$

Figura 5.5 – Malha de elementos finitos e demonstração do deslocamento do maciço de solo após ruptura para o Caso Modelo.



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 5.6 – Deslocamentos totais proveniente da análise de estabilidade global do Caso Modelo pelo método dos elementos finitos.



Fonte: Produção do próprio autor

A análise por elementos finitos para o Caso Modelo apresentou $FS = 1,43$.

5.2 CASO SOLO MOLE

5.2.1 Estudo A

5.2.1.1 Dimensionamento do geotêxtil

Fazendo-se uso do *software* RingtracS, primeiramente, foi possível determinar a resistência disponível do geotêxtil mínima necessária, ou seja, quando esta atingia valor maior ou igual à força mobilizada no encamisamento. Dentre outros resultados, o *software* gera em sua saída a magnitude das tensões atuantes no topo das colunas ($\sigma_{v,c}$) e no topo do solo mole ($\sigma_{v,s}$), como pode ser visto na figura a seguir.

Figura 5.7 - Resultados do dimensionamento do geotêxtil para o Estudo A do Caso Solo Mole no *software* RingtracS.

Result for 100/400 PM area ratio 15%		
Number of analysed slices	20	
Axial spacing in triangular pattern	1.97 m	
Design value of mobilized ring force	137.31 kN/m	
Available design strength in ring direction	185.53 kN/m	
Degree of use (1/f)	0.74	
Dead load steps Total load steps Print Report		
	Dead loads	Total loads
Pressure on top of columns	622.04 kN/m ²	947.00 kN/m ²
Pressure on top of soft soil	1.99 kN/m ²	3.47 kN/m ²
Efficiency of columns	0.98	0.98
Load on column top	312.67 kN	476.01 kN
Total settlement	0.22 m	0.33 m
Maximum ring strain	1.48 %	2.25 %
Mobilized ring force	69.50 kN/m	105.62 kN/m
Added embankment height	0.00 m	0.00 m
Equivalent cohesion	163.40 kN/m ²	248.30 kN/m ²

Fonte: Produção do próprio autor

A partir da figura, para o Estudo A do Caso Solo Mole, observa-se que:

- A resistência disponível na direção perimetral do geotêxtil vale 185,53 kN/m sendo superior à força mobilizada no encamisamento que apresenta resultado igual a 137,31 kN/m, portanto este geotêxtil resiste às solicitações, sendo o de menor resistência possível para o caso (maior economia);
- O geotêxtil Ringtrac 100/400 PM adotado apresenta módulo de rigidez nominal igual a 6500 kN/m, resistência à tração nominal igual a 100 kN/m na direção longitudinal e igual a 400 kN/m na direção perimetral e deformação na resistência nominal de 6% no sentido transversal;

- As tensões atuantes no topo das colunas ($\sigma_{v,c}$) foram de 947,00 kN/m², enquanto que as atuantes no topo do solo mole ($\sigma_{v,s}$) apresentam valor igual a 3,47 kN/m², resultando em uma eficiência das colunas de 98%;
- O dimensionamento indicou deformação máxima no reforço ($\epsilon_{geo,max}$) de 2,25%;
- A tração mobilizada no reforço geossintético (T_{geo}) foi de 105,62 kN/m, resultando em uma coesão equivalente pelo método de Raithel (c_{eq}) igual a 248,30 kN/m².

5.2.1.2 Análises de estabilidade global

5.2.1.2.1 Representação das colunas pelo método de Priebe considerando área equivalente

Pelo ábaco da Figura 3.7, o fator de melhoria (n) tem valor igual a 1,65 para os parâmetros adotados. Dessa forma, torna-se possível calcular o fator reduzido de concentração de tensões na coluna (recomendado).

$$m^* = \frac{n - 1}{n} = \frac{1,65 - 1}{1,65}$$

$$m^* = 0,39$$

Com esse fator, obtêm-se os parâmetros do solo equivalente:

$$\tan \varphi'_m = m^* \cdot \tan \varphi'_c + (1 - m^*) \cdot \tan \varphi'_s = 0,39 \cdot \tan 34^\circ + (1 - 0,39) \cdot \tan 18^\circ$$

$$\varphi'_m = 24,8^\circ$$

$$c'_m = (1 - m^*) \cdot c'_s = (1 - 0,39) \cdot 0,5$$

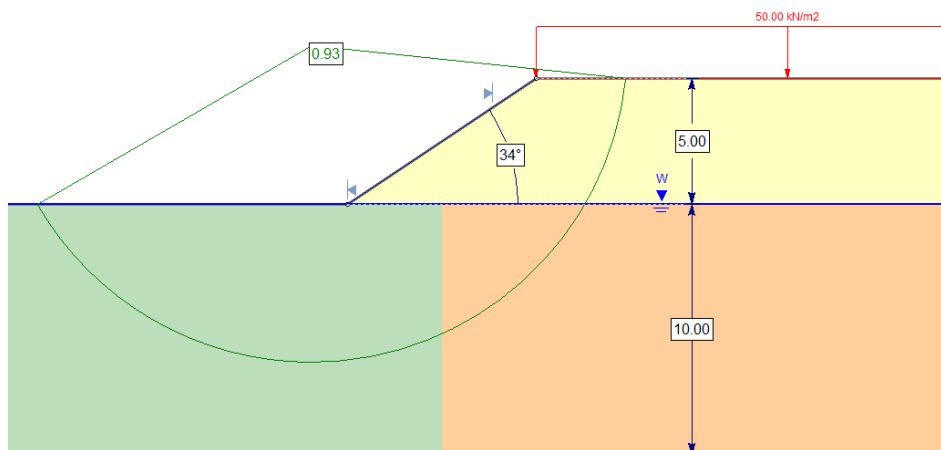
$$c'_m = 0,30 \text{ kPa}$$

$$\gamma_m = \gamma_c \cdot a_E + \gamma_s \cdot (1 - a_E) = 20 \cdot 0,15 + 16 \cdot (1 - 0,15)$$

$$\gamma_m = 16,6 \text{ kN/m}^3$$

Figura 5.8 - Análise da estabilidade global do Estudo A do Caso Solo Mole pelo método de Priebe considerando área equivalente.

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Cohesion Type	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Aterro		19	Mohr-Coulomb	20	30		Water Surface	Custom	1	
Solo Mole		16	Undrained	5		Constant	None			0
Solo Melhorado		16.6	Mohr-Coulomb	0.3	24.8		Water Surface	Custom	1	

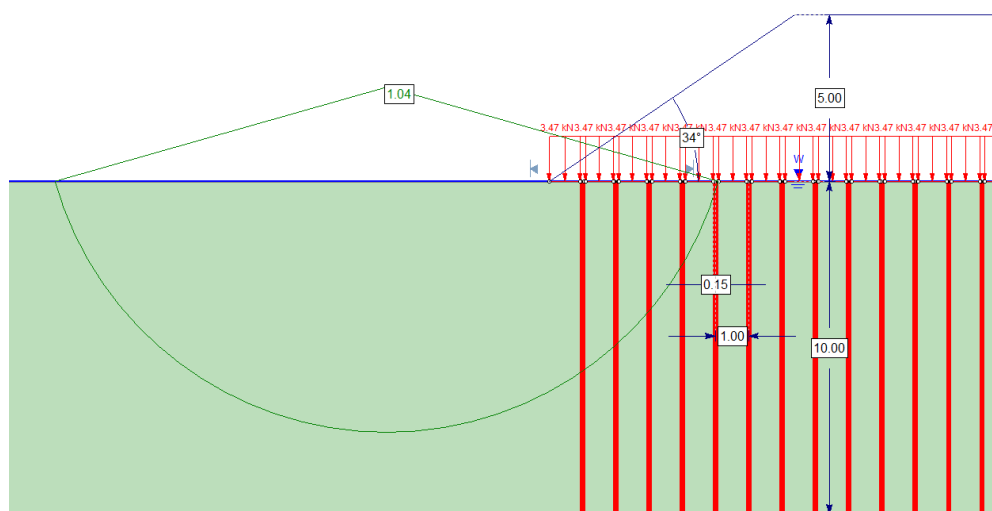


Fonte: Produção do próprio autor

5.2.1.2.2 Representação das colunas pelo método adaptado de Priebe considerando modelo das cargas concentradas

Figura 5.9 - Análise da estabilidade global do Estudo A do Caso Solo Mole pelo método adaptado de Priebe considerando cargas concentradas.

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Cohesion Type	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Coluna Granular		20	Mohr-Coulomb	0	34		Water Surface	Custom	1	
Solo Mole		16	Undrained	5		Constant	None			0



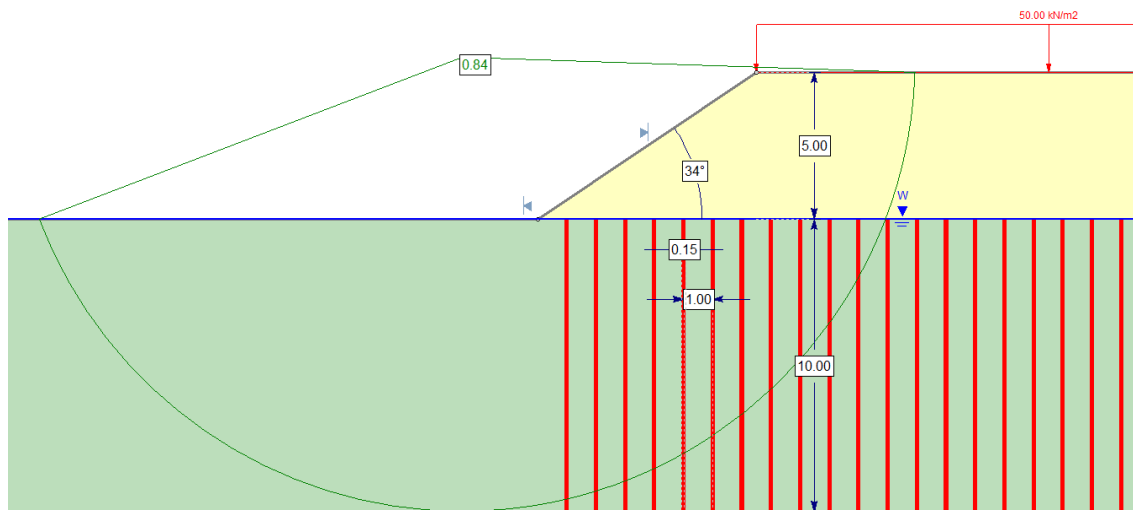
Fonte: Produção do próprio autor

5.2.1.2.3 Representação das colunas pelo modelo da coesão equivalente proposto por Raithel

A coesão equivalente proposta por Raithel pode ser obtida diretamente do *software* RingtracS mostrado na Figura 5.7, onde pode ser visto que tem magnitude igual a 248,30 kN/m².

Figura 5.10 - Análise da estabilidade global do Estudo A para o Caso Solo Mole pelo método de Raithel considerando coesão equivalente.

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m3)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Cohesion Type	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Aterro		19	Mohr-Coulomb	20	30		Water Surface	Custom	1	
Solo Mole		16	Undrained	5		Constant	None			0
Coluna Granular com Coesão Equivalente		20	Mohr-Coulomb	248.3	34		Water Surface	Custom	1	



Fonte: Produção do próprio autor

5.2.1.2.4 Representação das colunas pelo modelo do ângulo de atrito interno efetivo equivalente proposto por Raithel

Primeiramente, calcula-se o coeficiente de empuxo ativo:

$$K_{a,c} = \frac{1 - \sin \phi'_c}{1 + \sin \phi'_c} = \frac{1 - \sin 34^\circ}{1 + \sin 34^\circ}$$

$$K_{a,c} = 0,28$$

Considerando um ponto no meio da camada de argila e adotando o valor do acréscimo de tensão vertical sobre a coluna obtido com o resultado do *software* RingtracS, calcula-se o acréscimo da tensão horizontal atuante nas colunas:

$$\Delta\sigma_{h,c} = \Delta\sigma_{v,c} \cdot K_{a,c} + \sigma_{v,0,c} \cdot K_{a,c} = 947,00 \cdot 0,28 + \left(\frac{1}{2} \cdot 20 \cdot 10\right) \cdot 0,28$$

$$\Delta\sigma_{h,c} = 293,16 \text{ kN/m}$$

Sendo o raio do geossintético e sua deformação máxima dados, respectivamente, por:

$$r_{\text{geo}} = \Delta r_{\text{geo}} + r_{\text{geo},0}$$

$$\varepsilon_{\text{geo,max}} = \frac{\Delta r_{\text{geo}}}{r_{\text{geo}}}$$

tem-se o valor do raio do geossintético a partir do valor da deformação máxima do geossintético obtido com o resultado do *software* RingtracS :

$$r_{\text{geo}} = \frac{r_{\text{geo},0}}{1 - \varepsilon_{\text{geo,max}}} = \frac{0,40}{1 - 0,0225}$$

$$r_{\text{geo}} = 0,4092 \text{ m}$$

A partir do valor do raio do geossintético e da força mobilizada nele obtida pelo *software* RingtracS, calcula-se a tensão horizontal no geossintético:

$$\Delta\sigma_{h,\text{geo}} = \frac{T_{\text{geo}}}{r_{\text{geo}}} = \frac{105,62}{0,4092}$$

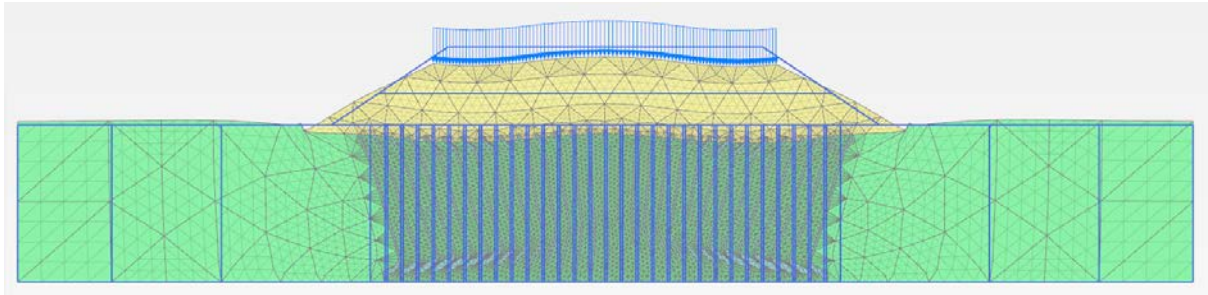
$$\Delta\sigma_{h,\text{geo}} = 258,11 \text{ kN/m}$$

Finalmente, torna-se possível calcular o ângulo de atrito interno efetivo equivalente:

$$\text{sen } \varphi'_{c,\text{eq}} = \frac{\frac{1 + \text{sen } \varphi'_c + \frac{\Delta\sigma_{h,\text{geo}}}{\Delta\sigma_{h,c}} - 1}{1 + \text{sen } \varphi'_c - \frac{\Delta\sigma_{h,\text{geo}}}{\Delta\sigma_{h,c}} + 1}}{\frac{1 + \text{sen } 34^\circ + \frac{258,11}{293,16} - 1}{1 + \text{sen } 34^\circ - \frac{258,11}{293,16} + 1}} = \frac{1 + \text{sen } 34^\circ + \frac{258,11}{293,16} - 1}{1 + \text{sen } 34^\circ - \frac{258,11}{293,16} + 1}$$

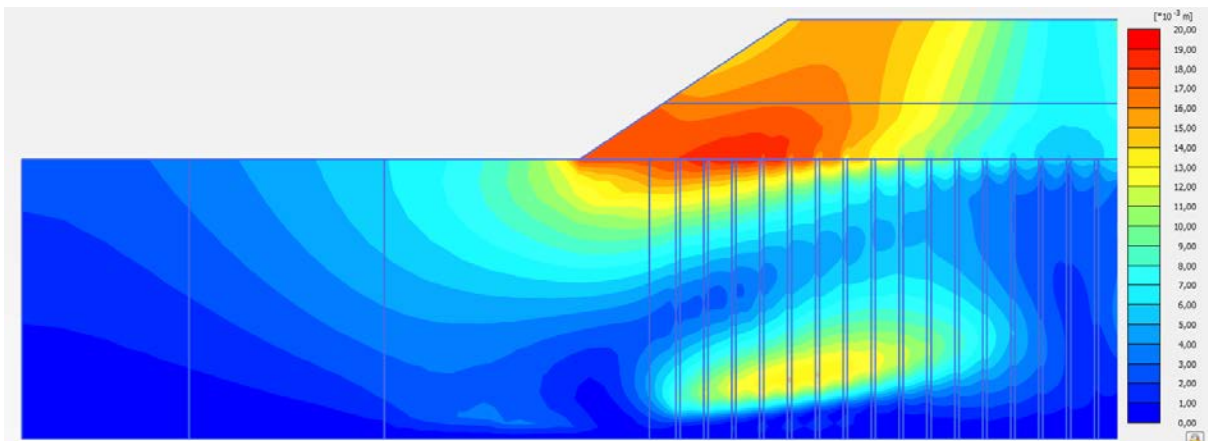
$$\varphi'_{c,\text{eq}} = 69,3^\circ$$

Figura 5.11 – Malha de elementos finitos e demonstração do deslocamento do maciço de solo após ruptura para o Estudo A do Caso Solo Mole.



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 5.12 – Deslocamentos totais proveniente da análise de estabilidade global do Estudo A Caso Solo Mole pelo método dos elementos finitos.



Fonte: Produção do próprio autor

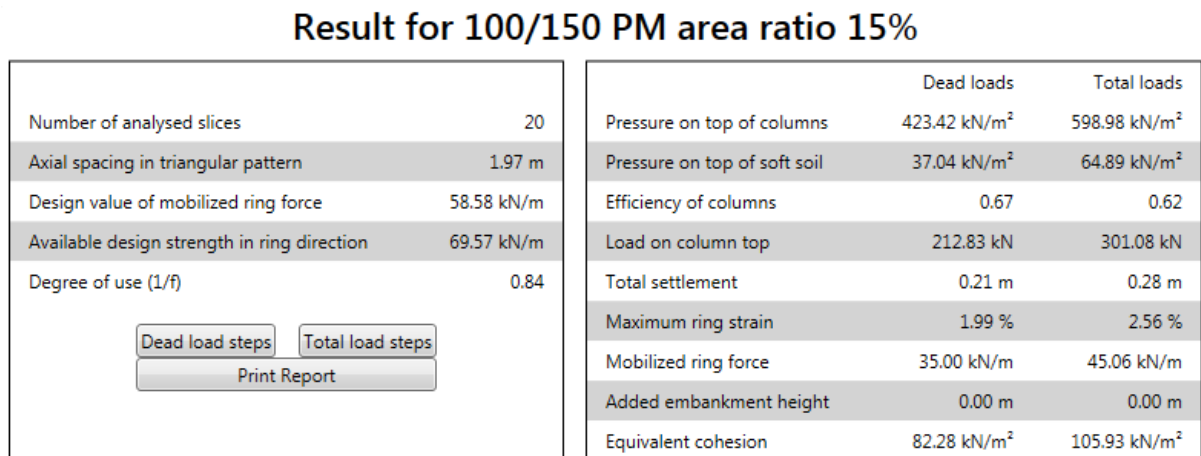
A análise por elementos finitos para o Estudo A Caso Solo Mole apresentou $FS = 0,73$.

5.2.2 Estudo B

5.2.2.1 Dimensionamento do geotêxtil

Fazendo-se uso do *software* RingtracS, primeiramente, foi possível determinar a resistência disponível do geotêxtil mínima necessária, ou seja, quando esta atingia valor maior ou igual à força mobilizada no encamisamento. Dentre outros resultados, o *software* gera em sua saída a magnitude das tensões atuantes no topo das colunas ($\sigma_{v,c}$) e no topo do solo mole ($\sigma_{v,s}$), como pode ser visto na figura a seguir.

Figura 5.13 - Resultados do dimensionamento do geotêxtil para o Estudo B do Caso Solo Mole no *software* RingtracS.



Fonte: Produção do próprio autor

A partir da figura, para o Estudo B do Caso Solo Mole, observa-se que:

- A resistência disponível na direção perimetral do geotêxtil vale 69,57 kN/m sendo superior à força mobilizada no encamisamento que apresenta resultado igual a 58,58 kN/m, portanto este geotêxtil resiste às solicitações, sendo o de menor resistência possível para o caso (maior economia);
- O geotêxtil Ringtrac 100/150 PM adotado apresenta módulo de rigidez nominal igual a 2000 kN/m e resistência à tração nominal igual a 100 kN/m na direção longitudinal e igual a 150 kN/m na direção perimetral e deformação na resistência nominal de 6% no sentido transversal;

- As tensões atuantes no topo das colunas ($\sigma_{v,c}$) foram de 598,98 kN/m², enquanto que as atuantes no topo do solo mole ($\sigma_{v,s}$) apresentam valor igual a 64,89 kN/m², resultando em uma eficiência das colunas de 62%;
- O dimensionamento indicou deformação máxima no reforço ($\epsilon_{geo,max}$) de 2,56%;
- A tração mobilizada no reforço geossintético (T_{geo}) foi de 45,06 kN/m, resultando em uma coesão equivalente pelo método de Raithel (c_{eq}) igual a 105,93 kN/m².

5.2.2.2 Análises de estabilidade global

5.2.2.2.1 Representação das colunas pelo método de Priebe considerando área equivalente

Pelo ábaco da Figura 3.7, o fator de melhoria (n) tem valor igual a 1,65 para os parâmetros adotados. Dessa forma, torna-se possível calcular o fator reduzido de concentração de tensões na coluna (recomendado).

$$m^* = \frac{n - 1}{n} = \frac{1,65 - 1}{1,65}$$

$$m^* = 0,39$$

Com esse fator, obtêm-se os parâmetros do solo equivalente:

$$\tan \varphi'_m = m^* \cdot \tan \varphi'_c + (1 - m^*) \cdot \tan \varphi'_s = 0,39 \cdot \tan 34^\circ + (1 - 0,39) \cdot \tan 30^\circ$$

$$\varphi'_m = 31,6^\circ$$

$$c'_m{}^* = (1 - m^*) \cdot c'_s = (1 - 0,39) \cdot 3,5$$

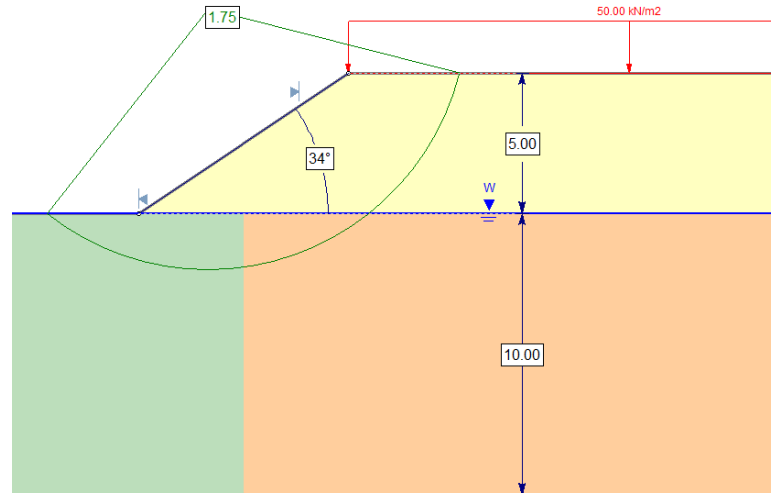
$$c'_m{}^* = 2,13 \text{ kPa}$$

$$\gamma_m = \gamma_c \cdot a_E + \gamma_s \cdot (1 - a_E) = 20 \cdot 0,15 + 16 \cdot (1 - 0,15)$$

$$\gamma_m = 16,6 \text{ kN/m}^3$$

Figura 5.14 - Análise da estabilidade global do Estudo B do Caso Solo Mole pelo método de Priebe considerando área equivalente.

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Cohesion Type	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Aterro		19	Mohr-Coulomb	20	30		Water Surface	Custom	1	
Solo Mole		16	Undrained	25		Constant	None			0
Solo Melhorado		16.6	Mohr-Coulomb	2.13	31.6		Water Surface	Custom	1	

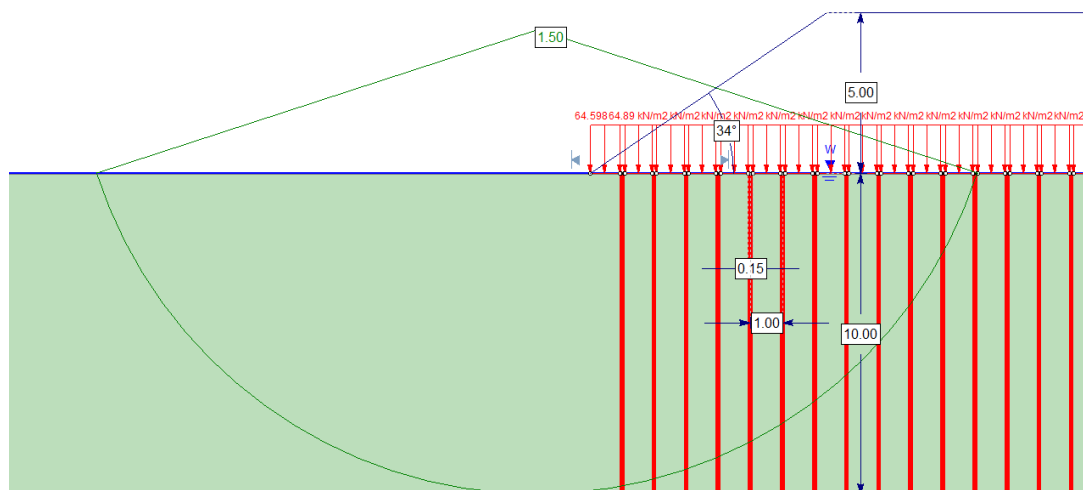


Fonte: Produção do próprio autor

5.2.2.2 Representação das colunas pelo método adaptado de Priebe considerando modelo das cargas concentradas

Figura 5.15 - Análise da estabilidade global do Estudo B do Caso Solo Mole pelo método adaptado de Priebe considerando cargas concentradas.

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Cohesion Type	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Coluna Granular		20	Mohr-Coulomb	0	34		Water Surface	Custom	1	
Solo Mole		16	Undrained	25		Constant	None			0

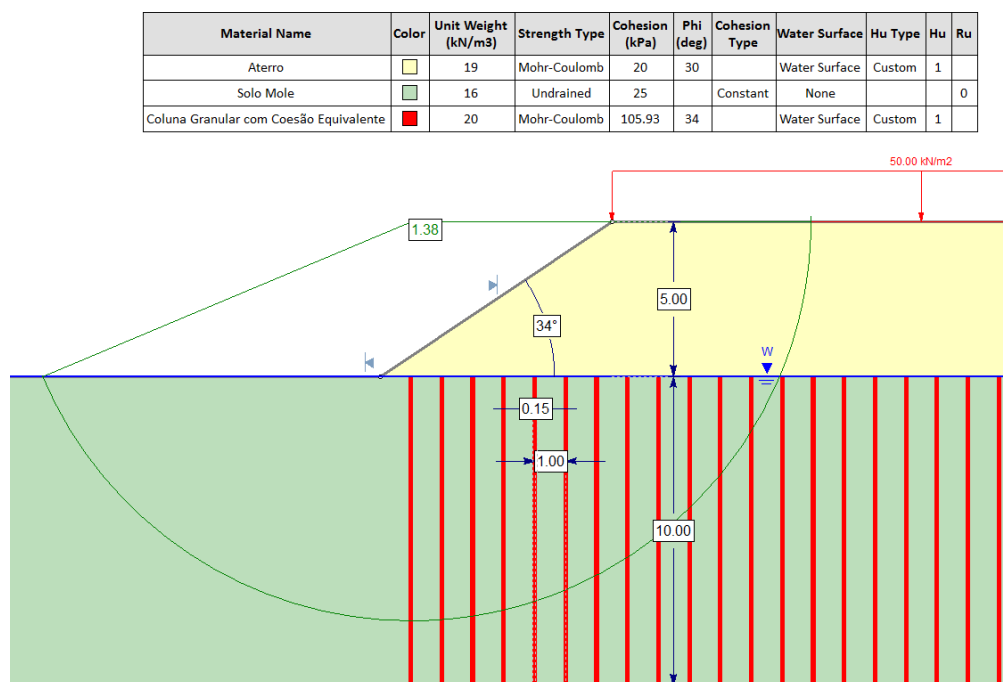


Fonte: Produção do próprio autor

5.2.2.2.3 Representação das colunas pelo modelo da coesão equivalente proposto por Raithel

A coesão equivalente proposta por Raithel pode ser obtida diretamente do *software* RingtracS mostrada na Figura 5.13, onde pode ser visto que tem magnitude igual a 105,93 kN/m².

Figura 5.16 - Análise da estabilidade global do Estudo B do Caso Solo Mole pelo método de Raithel considerando coesão equivalente.



Fonte: Produção do próprio autor

5.2.2.2.4 Representação das colunas pelo modelo do ângulo de atrito interno efetivo equivalente proposto por Raithel

Primeiramente, calcula-se o coeficiente de empuxo ativo:

$$K_{a,c} = \frac{1 - \sin \phi'_c}{1 + \sin \phi'_c} = \frac{1 - \sin 34^\circ}{1 + \sin 34^\circ}$$

$$K_{a,c} = 0,28$$

Considerando um ponto no meio da camada de argila e adotando o valor do acréscimo de tensão vertical sobre a coluna obtido com o resultado do *software* RingtracS, calcula-se o acréscimo da tensão horizontal atuante nas colunas:

$$\Delta\sigma_{h,c} = \Delta\sigma_{v,c} \cdot K_{a,c} + \sigma_{v,0,c} \cdot K_{a,c} = 598,98 \cdot 0,28 + \left(\frac{1}{2} \cdot 20 \cdot 10\right) \cdot 0,28$$

$$\Delta\sigma_{h,c} = 195,71 \text{ kN/m}$$

Sendo o raio do geossintético e sua deformação máxima dados, respectivamente, por:

$$r_{\text{geo}} = \Delta r_{\text{geo}} + r_{\text{geo},0}$$

$$\varepsilon_{\text{geo,max}} = \frac{\Delta r_{\text{geo}}}{r_{\text{geo}}}$$

tem-se o valor do raio do geossintético a partir do valor da deformação máxima do geossintético obtido com o resultado do *software* RingtracS :

$$r_{\text{geo}} = \frac{r_{\text{geo},0}}{1 - \varepsilon_{\text{geo,max}}} = \frac{0,40}{1 - 0,0256}$$

$$r_{\text{geo}} = 0,4105 \text{ m}$$

A partir do valor do raio do geossintético e da força mobilizada nele obtida pelo *software* RingtracS, calcula-se a tensão horizontal no geossintético:

$$\Delta\sigma_{h,\text{geo}} = \frac{T_{\text{geo}}}{r_{\text{geo}}} = \frac{45,06}{0,4105}$$

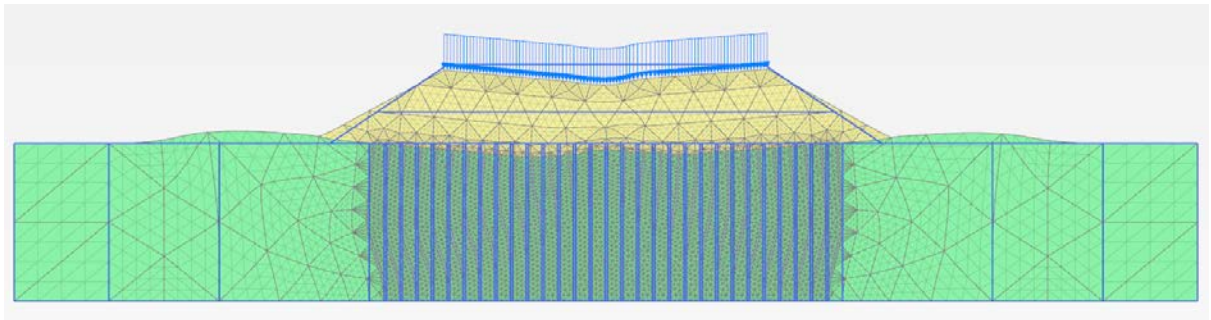
$$\Delta\sigma_{h,\text{geo}} = 109,77 \text{ kN/m}$$

Finalmente, torna-se possível calcular o ângulo de atrito interno efetivo equivalente:

$$\text{sen } \varphi'_{c,\text{eq}} = \frac{\frac{1 + \text{sen } \varphi'_c + \frac{\Delta\sigma_{h,\text{geo}}}{\Delta\sigma_{h,c}} - 1}{1 + \text{sen } \varphi'_c - \frac{\Delta\sigma_{h,\text{geo}}}{\Delta\sigma_{h,c}} + 1}}{\frac{1 + \text{sen } 34^\circ + \frac{109,77}{195,71} - 1}{1 + \text{sen } 34^\circ - \frac{109,77}{195,71} + 1}} = \frac{1 + \text{sen } 34^\circ + \frac{109,77}{195,71} - 1}{1 + \text{sen } 34^\circ - \frac{109,77}{195,71} + 1}$$

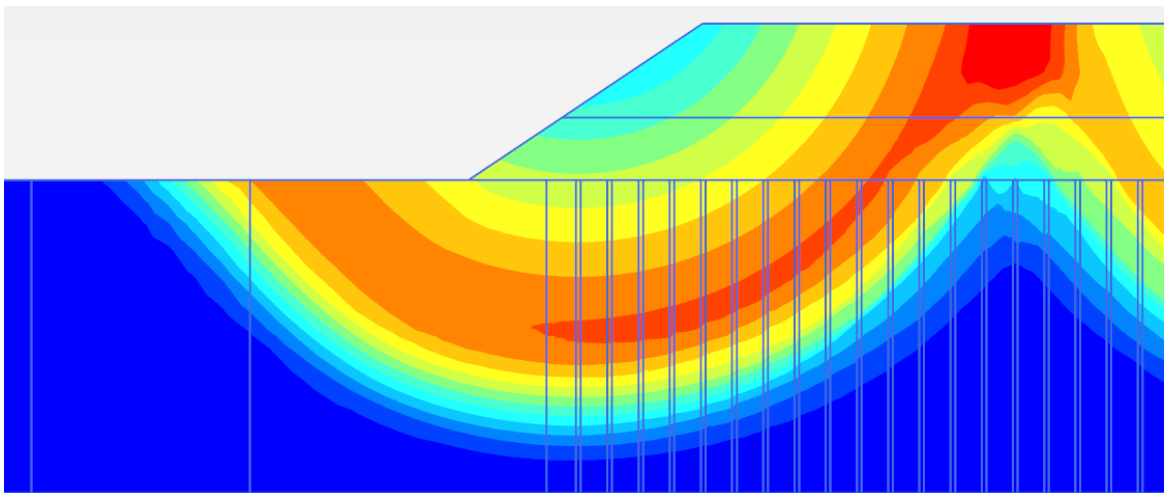
$$\varphi'_{c,\text{eq}} = 51,2^\circ$$

Figura 5.17 – Malha de elementos finitos e demonstração do deslocamento do maciço de solo após ruptura para o Estudo B do Caso Solo Mole.



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 5.18 – Deslocamentos totais proveniente da análise de estabilidade global do Estudo B Caso Solo Mole pelo método dos elementos finitos.



Fonte: Produção do próprio autor

A análise por elementos finitos para o Estudo B do Caso Solo Mole apresentou $FS = 1,79$.

5.2.3 Estudo C

5.2.3.1 Dimensionamento do geotêxtil

Fazendo-se uso do *software* RingtracS, adotou-se a magnitude do módulo de rigidez do geotêxtil igual ao valor obtido com o dimensionamento para o Estudo A do Caso Solo Mole: 6500 kN/m (Ringtrac 100/400 MP); enquanto que os parâmetros do solo mole foram os mesmos adotados no Estudo B. Dentre outros resultados, o *software* gera em sua saída a magnitude das tensões atuantes no topo das colunas ($\sigma_{v,c}$) e no topo do solo mole ($\sigma_{v,s}$), como pode ser visto na figura a seguir.

Figura 5.19 - Resultados do dimensionamento do geotêxtil para o Estudo C do Caso Solo Mole no *software* RingtracS.

Result for 100/400 PM area ratio 15%		
Number of analysed slices	20	
Axial spacing in triangular pattern	1.97 m	
Design value of mobilized ring force	105.20 kN/m	
Available design strength in ring direction	185.53 kN/m	
Degree of use (1/f)	0.57	
Dead load steps Total load steps Print Report		
	Dead loads	Total loads
Pressure on top of columns	549.08 kN/m ²	808.14 kN/m ²
Pressure on top of soft soil	14.87 kN/m ²	27.97 kN/m ²
Efficiency of columns	0.87	0.84
Load on column top	276.00 kN	406.22 kN
Total settlement	0.15 m	0.21 m
Maximum ring strain	1.20 %	1.72 %
Mobilized ring force	56.20 kN/m	80.92 kN/m
Added embankment height	0.00 m	0.00 m
Equivalent cohesion	132.11 kN/m ²	190.25 kN/m ²

Fonte: Produção do próprio autor

A partir da figura, para o Estudo C do Caso Solo Mole, observa-se que:

- A resistência disponível na direção perimetral do geotêxtil vale 185,53 kN/m sendo superior à força mobilizada no encamisamento que apresenta resultado igual a 105,20 kN/m, portanto este geotêxtil resiste às solicitações, sendo o de menor resistência possível para o caso (maior economia);
- O geotêxtil Ringtrac 100/400 PM adotado apresenta módulo de rigidez nominal igual a 6500 kN/m e resistência à tração nominal igual a 100 kN/m na direção longitudinal e igual a 400 kN/m na direção perimetral e deformação na resistência nominal de 6% no sentido transversal;

- As tensões atuantes no topo das colunas ($\sigma_{v,c}$) foram de 808,14 kN/m², enquanto que as atuantes no topo do solo mole ($\sigma_{v,s}$) apresentam valor igual a 27,97 kN/m², resultando em uma eficiência das colunas de 84%;
- O dimensionamento indicou deformação máxima no reforço ($\epsilon_{geo,max}$) de 1,72%;
- A tração mobilizada no reforço geossintético (T_{geo}) foi de 80,92 kN/m, resultando em uma coesão equivalente pelo método de Raithel (c_{eq}) igual a 190,25 kN/m².

5.2.3.2 Análises de estabilidade global

5.2.3.2.1 Representação das colunas pelo método de Priebe considerando área equivalente

Pelo ábaco da Figura 3.7, o fator de melhoria (n) tem valor igual a 1,65 para os parâmetros adotados. Dessa forma, torna-se possível calcular o fator reduzido de concentração de tensões na coluna (recomendado).

$$m^* = \frac{n - 1}{n} = \frac{1,65 - 1}{1,65}$$

$$m^* = 0,39$$

Com esse fator, obtêm-se os parâmetros do solo equivalente:

$$\tan \varphi'_m = m^* \cdot \tan \varphi'_c + (1 - m^*) \cdot \tan \varphi'_s = 0,39 \cdot \tan 34^\circ + (1 - 0,39) \cdot \tan 30^\circ$$

$$\varphi'_m = 31,6^\circ$$

$$c'_m = (1 - m^*) \cdot c'_s = (1 - 0,39) \cdot 3,5$$

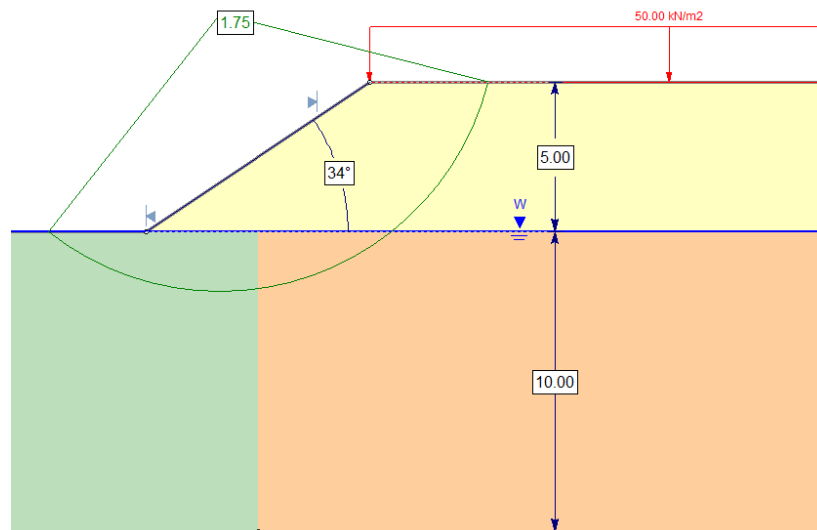
$$c'_m = 2,13 \text{ kPa}$$

$$\gamma_m = \gamma_c \cdot a_E + \gamma_s \cdot (1 - a_E) = 20 \cdot 0,15 + 16 \cdot (1 - 0,15)$$

$$\gamma_m = 16,6 \text{ kN/m}^3$$

Figura 5.20 - Análise da estabilidade global do Estudo C do Caso Solo Mole pelo método de Priebe considerando área equivalente.

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Cohesion Type	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Aterro		19	Mohr-Coulomb	20	30		Water Surface	Custom	1	
Solo Mole		16	Undrained	25		Constant	None			0
Solo Melhorado		16.6	Mohr-Coulomb	2.13	31.6		Water Surface	Custom	1	

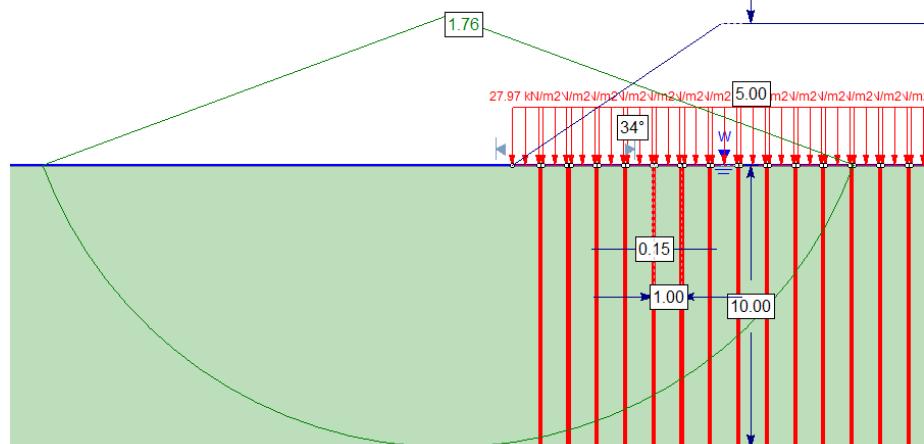


Fonte: Produção do próprio autor

5.2.3.2.2 Representação das colunas pelo método adaptado de Priebe considerando modelo das cargas concentradas

Figura 5.21 - Análise da estabilidade global do Estudo C do Caso Solo Mole pelo método adaptado de Priebe considerando cargas concentradas.

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Cohesion Type	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Coluna Granular		20	Mohr-Coulomb	0	34		Water Surface	Custom	1	
Solo Mole		16	Undrained	25		Constant	None			0

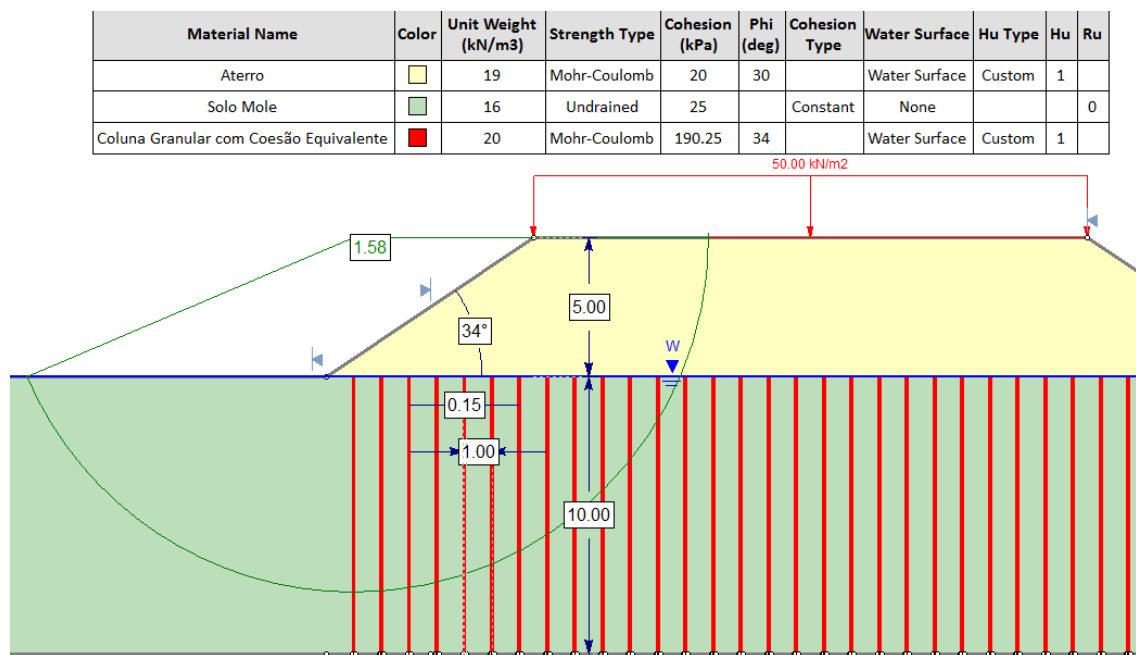


Fonte: Produção do próprio autor

5.2.3.2.3 Representação das colunas pelo modelo da coesão equivalente proposto por Raithel

A coesão equivalente proposta por Raithel pode ser obtida diretamente do *software* RingtracS mostrada na Figura 5.19, onde pode ser visto que tem magnitude igual a 190,25 kN/m².

Figura 5.22 - Análise da estabilidade global do Estudo C do Caso Solo Mole pelo método de Raithel considerando coesão equivalente.



Fonte: Produção do próprio autor

5.3 CASO MATERIAL PREENCHIMENTO

5.3.1 Estudo A com preenchimento de areia

5.3.1.1 Dimensionamento do geotêxtil

Fazendo-se uso do *software* RingtracS, primeiramente, foi possível determinar a resistência disponível do geotêxtil mínima necessária, ou seja, quando esta atinja valor maior ou igual à força mobilizada no encamisamento. Dentre outros resultados, o *software* gera em sua saída a magnitude das tensões atuantes no topo das colunas ($\sigma_{v,c}$) e no topo do solo mole ($\sigma_{v,s}$), como pode ser visto na figura a seguir.

Figura 5.23 - Resultados do dimensionamento do geotêxtil para o Estudo A com preenchimento de areia do Caso Material Preenchimento no *software* RingtracS.

Result for 100/200 PM area ratio 15%		
Number of analysed slices	20	
Axial spacing in triangular pattern	1.97 m	
Design value of mobilized ring force	108.19 kN/m	
Available design strength in ring direction	108.23 kN/m	
Degree of use (1/f)	1.00	
Dead load steps Total load steps Print Report		
	Dead loads	Total loads
Pressure on top of columns	493.61 kN/m ²	702.16 kN/m ²
Pressure on top of soft soil	24.66 kN/m ²	46.68 kN/m ²
Efficiency of columns	0.78	0.73
Load on column top	248.11 kN	352.94 kN
Total settlement	0.29 m	0.39 m
Maximum ring strain	2.63 %	3.54 %
Mobilized ring force	61.75 kN/m	83.23 kN/m
Added embankment height	0.00 m	0.00 m
Equivalent cohesion	128.46 kN/m ²	173.14 kN/m ²

Fonte: Produção do próprio autor

A partir da figura, para o Estudo A com preenchimento de areia do Caso Material Preenchimento, observa-se que:

- A resistência disponível na direção perimetral do geotêxtil vale 108,23 kN/m sendo superior à força mobilizada no encamisamento que apresenta resultado igual a 108,19 kN/m, portanto este geotêxtil resiste às solicitações, sendo o de menor resistência possível para o caso (maior economia);
- O geotêxtil Ringtrac 100/200 PM adotado apresenta módulo de rigidez nominal igual a 3500 kN/m, resistência à tração nominal igual a 100 kN/m na direção

longitudinal e igual a 200 kN/m na direção perimetral e deformação na resistência nominal de 6% no sentido transversal;

- As tensões atuantes no topo das colunas ($\sigma_{v,c}$) foram de 702,16 kN/m², enquanto que as atuantes no topo do solo mole ($\sigma_{v,s}$) apresentam valor igual a 46,68 kN/m², resultando em uma eficiência das colunas de 73%;
- O dimensionamento indicou deformação máxima no reforço ($\epsilon_{geo,max}$) de 3,54%;
- A tração mobilizada no reforço geossintético (T_{geo}) foi de 83,23 kN/m, resultando em uma coesão equivalente pelo método de Raithel (c_{eq}) igual a 173,14 kN/m².

5.3.1.2 Análises de estabilidade global

5.3.1.2.1 Representação das colunas pelo método de Priebe considerando área equivalente

Pelo ábaco da Figura 3.7, o fator de melhoria (n) tem valor igual a 1,50 para os parâmetros adotados. Dessa forma, torna-se possível calcular o fator reduzido de concentração de tensões na coluna (recomendado).

$$m^* = \frac{n - 1}{n} = \frac{1,50 - 1}{1,50}$$

$$m^* = 0,33$$

Com esse fator, obtêm-se os parâmetros do solo equivalente:

$$\tan \varphi'_m = m^* \cdot \tan \varphi'_c + (1 - m^*) \cdot \tan \varphi'_s = 0,33 \cdot \tan 28^\circ + (1 - 0,33) \cdot \tan 24^\circ$$

$$\varphi'_m = 25,3^\circ$$

$$c'^*_m = (1 - m^*) \cdot c'_s = (1 - 0,33) \cdot 2,0$$

$$c'^*_m = 1,34 \text{ kPa}$$

$$\gamma_m = \gamma_c \cdot a_E + \gamma_s \cdot (1 - a_E) = 20 \cdot 0,15 + 16 \cdot (1 - 0,15)$$

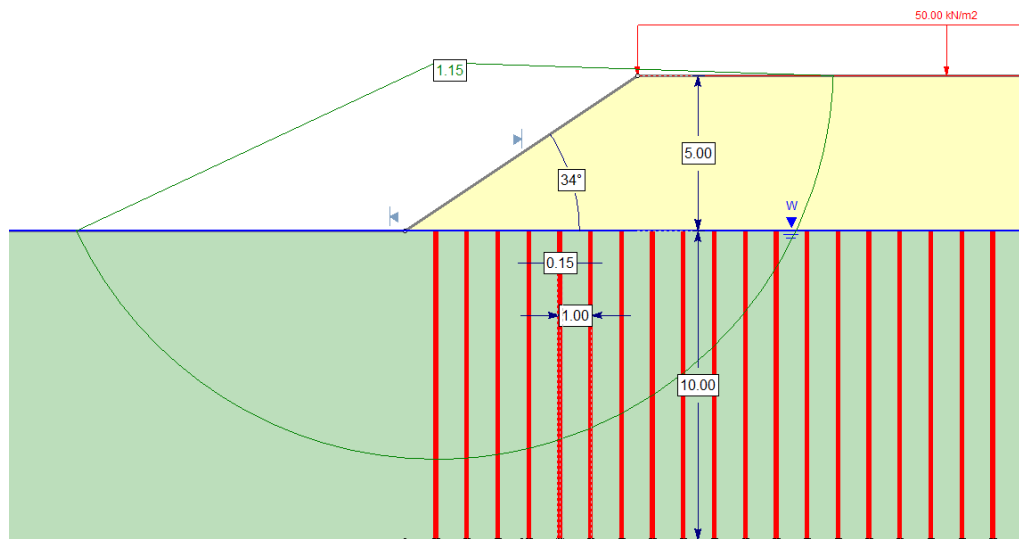
$$\gamma_m = 16,6 \text{ kN/m}^3$$

5.3.1.2.3 Representação das colunas pelo modelo da coesão equivalente proposto por Raithel

A coesão equivalente proposta por Raithel pode ser obtida diretamente do *software* RingtracS mostrada na Figura 5.23, onde pode ser visto que tem magnitude igual a 173,14 kN/m².

Figura 5.26 - Análise da estabilidade global para o Estudo A com preenchimento de areia do Caso Material Preenchimento pelo método de Raithel considerando coesão equivalente.

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Cohesion Type	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Aterro		19	Mohr-Coulomb	20	30		Water Surface	Custom	1	
Solo Mole		16	Undrained	15		Constant	None			0
Coluna Granular com Coesão Equivalente		20	Mohr-Coulomb	173.14	28		Water Surface	Custom	1	



Fonte: Produção do próprio autor

5.3.1.2.4 Representação das colunas pelo modelo do ângulo de atrito interno efetivo equivalente proposto por Raithel

Primeiramente, calcula-se o coeficiente de empuxo ativo:

$$K_{a,c} = \frac{1 - \sin \phi'_c}{1 + \sin \phi'_c} = \frac{1 - \sin 28^\circ}{1 + \sin 28^\circ}$$

$$K_{a,c} = 0,36$$

Considerando um ponto no meio da camada de argila e adotando o valor do acréscimo de tensão vertical sobre a coluna obtido com o resultado do *software* RingtracS, calcula-se o acréscimo da tensão horizontal atuante nas colunas:

$$\Delta\sigma_{h,c} = \Delta\sigma_{v,c} \cdot K_{a,c} + \sigma_{v,0,c} \cdot K_{a,c} = 702,16 \cdot 0,36 + \left(\frac{1}{2} \cdot 20 \cdot 10\right) \cdot 0,36$$

$$\Delta\sigma_{h,c} = 288,78 \text{ kN/m}$$

Sendo o raio do geossintético e sua deformação máxima dados, respectivamente, por:

$$r_{\text{geo}} = \Delta r_{\text{geo}} + r_{\text{geo},0}$$

$$\varepsilon_{\text{geo,max}} = \frac{\Delta r_{\text{geo}}}{r_{\text{geo}}}$$

tem-se o valor do raio do geossintético a partir do valor da deformação máxima do geossintético obtido com o resultado do *software* RingtracS :

$$r_{\text{geo}} = \frac{r_{\text{geo},0}}{1 - \varepsilon_{\text{geo,max}}} = \frac{0,40}{1 - 0,0354}$$

$$r_{\text{geo}} = 0,4147 \text{ m}$$

A partir do valor do raio do geossintético e da força mobilizada nele obtida pelo *software* RingtracS, calcula-se a tensão horizontal no geossintético:

$$\Delta\sigma_{h,\text{geo}} = \frac{T_{\text{geo}}}{r_{\text{geo}}} = \frac{83,23}{0,4147}$$

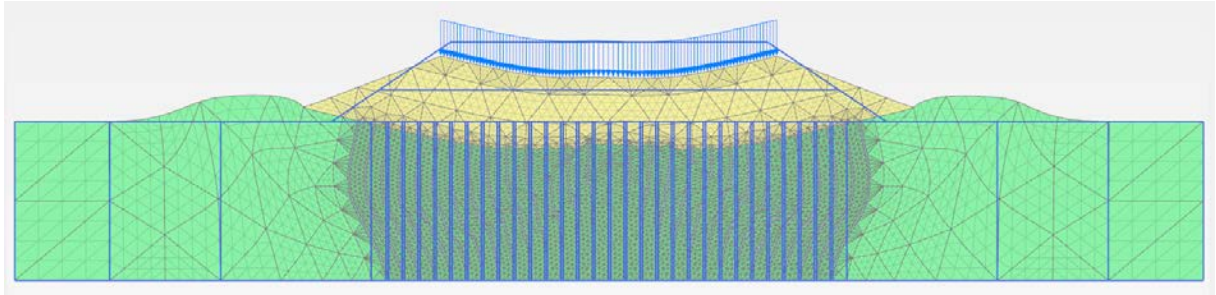
$$\Delta\sigma_{h,\text{geo}} = 200,70 \text{ kN/m}$$

Finalmente, torna-se possível calcular o ângulo de atrito interno efetivo equivalente:

$$\text{sen } \varphi'_{c,\text{eq}} = \frac{\frac{1 + \text{sen } \varphi'_c + \frac{\Delta\sigma_{h,\text{geo}}}{\Delta\sigma_{h,c}} - 1}{1 - \text{sen } \varphi'_c - \frac{\Delta\sigma_{h,\text{geo}}}{\Delta\sigma_{h,c}} + 1}}{\frac{1 + \text{sen } 28^\circ + \frac{200,70}{288,78} - 1}{1 - \text{sen } 28^\circ - \frac{200,70}{288,78} + 1}} = \frac{\frac{1 + \text{sen } 28^\circ + \frac{200,70}{288,78} - 1}{1 - \text{sen } 28^\circ - \frac{200,70}{288,78} + 1}}$$

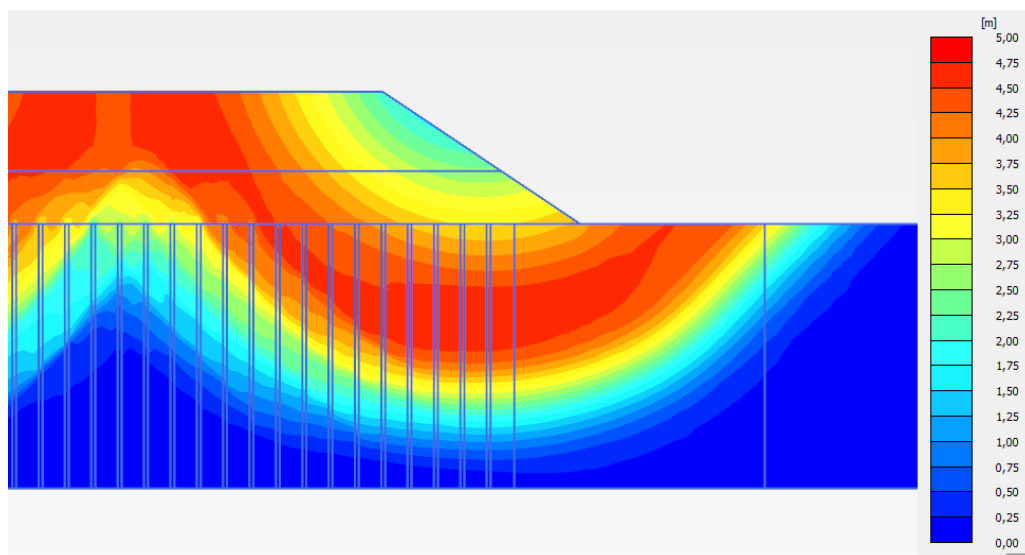
$$\varphi'_{c,\text{eq}} = 53,3^\circ$$

Figura 5.27 – Malha de elementos finitos e demonstração do deslocamento do maciço de solo após ruptura para o Estudo A com preenchimento de areia do Caso Material Preenchimento.



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 5.28 – Deslocamentos totais proveniente da análise de estabilidade global do Estudo A com preenchimento de areia do Caso Material Preenchimento pelo método dos elementos finitos.



Fonte: Produção do próprio autor

A análise por elementos finitos para o Estudo A com preenchimento de areia do Caso Material Preenchimento apresentou $FS = 1,31$.

5.3.2 Estudo B com preenchimento de areia

5.3.2.1 Dimensionamento do geotêxtil

Fazendo-se uso do *software* RingtracS, primeiramente, foi possível determinar a resistência disponível do geotêxtil mínima necessária, ou seja, quando esta atingia valor maior ou igual à força mobilizada no encamisamento. Dentre outros resultados, o *software* gera em sua saída a magnitude das tensões atuantes no topo das colunas ($\sigma_{v,c}$) e no topo do solo mole ($\sigma_{v,s}$), como pode ser visto na figura a seguir.

Figura 5.29 - Resultados do dimensionamento do geotêxtil para o Estudo B com preenchimento de areia do Caso Material Preenchimento no *software* RingtracS.

Result for 100/150 PM area ratio 15%

Number of analysed slices	20	Dead loads	Total loads
Axial spacing in triangular pattern	1.97 m	Pressure on top of columns	531.00 kN/m ² 774.18 kN/m ²
Design value of mobilized ring force	70.41 kN/m	Pressure on top of soft soil	18.06 kN/m ² 33.97 kN/m ²
Available design strength in ring direction	81.17 kN/m	Efficiency of columns	0.84 0.80
Degree of use (1/f)	0.87	Load on column top	266.91 kN 389.15 kN
Dead load steps Total load steps		Total settlement	0.23 m 0.33 m
Print Report		Maximum ring strain	2.23 % 3.07 %
		Mobilized ring force	39.22 kN/m 54.16 kN/m
		Added embankment height	0.00 m 0.00 m
		Equivalent cohesion	105.14 kN/m ² 145.18 kN/m ²

Fonte: Produção do próprio autor

A partir da figura, para o Estudo B com preenchimento de areia do Caso Material Preenchimento, observa-se que:

- A resistência disponível na direção perimetral do geotêxtil vale 81,17 kN/m sendo superior à força mobilizada no encamisamento que apresenta resultado igual a 70,41 kN/m, portanto este geotêxtil resiste às solicitações, sendo o de menor resistência possível para o caso (maior economia);
- O geotêxtil Ringtrac 100/150 PM adotado apresenta módulo de rigidez nominal igual a 2000 kN/m, resistência à tração nominal igual a 100 kN/m na direção longitudinal e igual a 150 kN/m na direção perimetral e deformação na resistência nominal de 6% no sentido transversal;

- As tensões atuantes no topo das colunas ($\sigma_{v,c}$) foram de 774,18 kN/m², enquanto que as atuantes no topo do solo mole ($\sigma_{v,s}$) apresentam valor igual a 33,97 kN/m², resultando em uma eficiência das colunas de 80%;
- O dimensionamento indicou deformação máxima no reforço ($\epsilon_{geo,max}$) de 3,07%;
- A tração mobilizada no reforço geossintético (T_{geo}) foi de 54,16 kN/m, resultando em uma coesão equivalente pelo método de Raithel (c_{eq}) igual a 145,18 kN/m².

5.3.2.2 Análises de estabilidade global

5.3.2.2.1 A Representação das colunas pelo método de Priebe considerando área equivalente

Pelo ábaco da Figura 3.7, o fator de melhoria (n) tem valor igual a 1,8 para os parâmetros adotados. Dessa forma, torna-se possível calcular o fator reduzido de concentração de tensões na coluna (recomendado).

$$m^* = \frac{n - 1}{n} = \frac{1,8 - 1}{1,8}$$

$$m^* = 0,44$$

Com esse fator, obtêm-se os parâmetros do solo equivalente:

$$\tan \varphi'_m = m^* \cdot \tan \varphi'_c + (1 - m^*) \cdot \tan \varphi'_s = 0,44 \cdot \tan 40^\circ + (1 - 0,44) \cdot \tan 24^\circ$$

$$\varphi'_m = 31,7^\circ$$

$$c'_m = (1 - m^*) \cdot c'_s = (1 - 0,44) \cdot 2,0$$

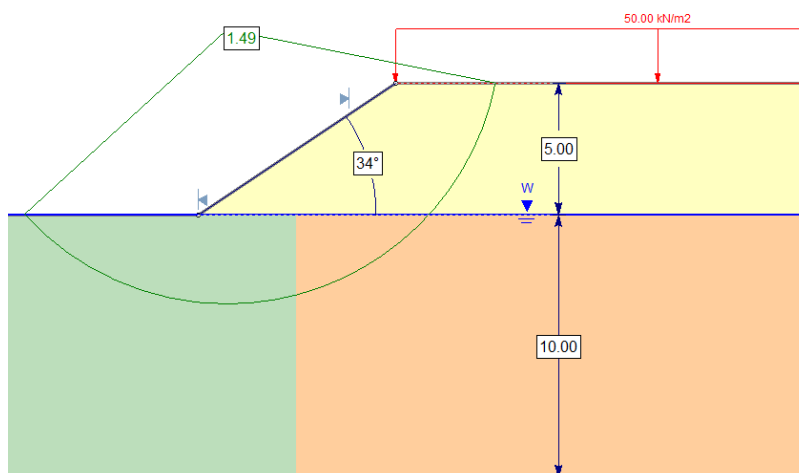
$$c'_m = 1,12 \text{ kPa}$$

$$\gamma_m = \gamma_c \cdot a_E + \gamma_s \cdot (1 - a_E) = 20 \cdot 0,15 + 16 \cdot (1 - 0,15)$$

$$\gamma_m = 16,6 \text{ kN/m}^3$$

Figura 5.30 - Análise da estabilidade global para o Estudo B com preenchimento de areia do Caso Material Preenchimento pelo método de Priebe considerando área equivalente.

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Cohesion Type	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Aterro		19	Mohr-Coulomb	20	30		Water Surface	Custom	1	
Solo Mole		16	Undrained	15		Constant	None			0
Solo Melhorado		16.6	Mohr-Coulomb	1.12	31.7		Water Surface	Custom	1	

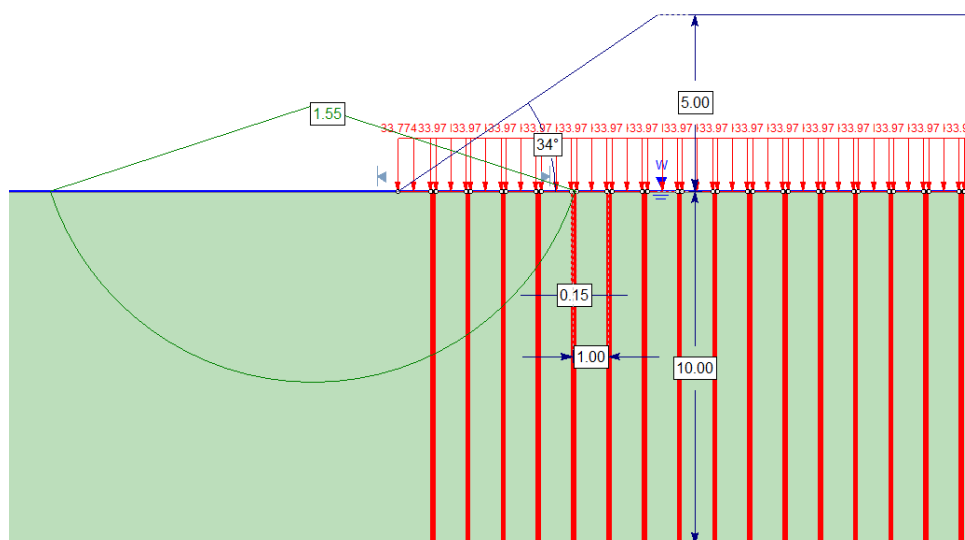


Fonte: Produção do próprio autor

5.3.2.2.2 Representação das colunas pelo método adaptado de Priebe considerando modelo das cargas concentradas

Figura 5.31 - Análise da estabilidade global para o Estudo B com preenchimento de areia do Caso Material Preenchimento pelo método adaptado de Priebe considerando cargas concentradas.

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Cohesion Type	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Coluna Granular		20	Mohr-Coulomb	0	40		Water Surface	Custom	1	
Solo Mole		16	Undrained	15		Constant	None			0



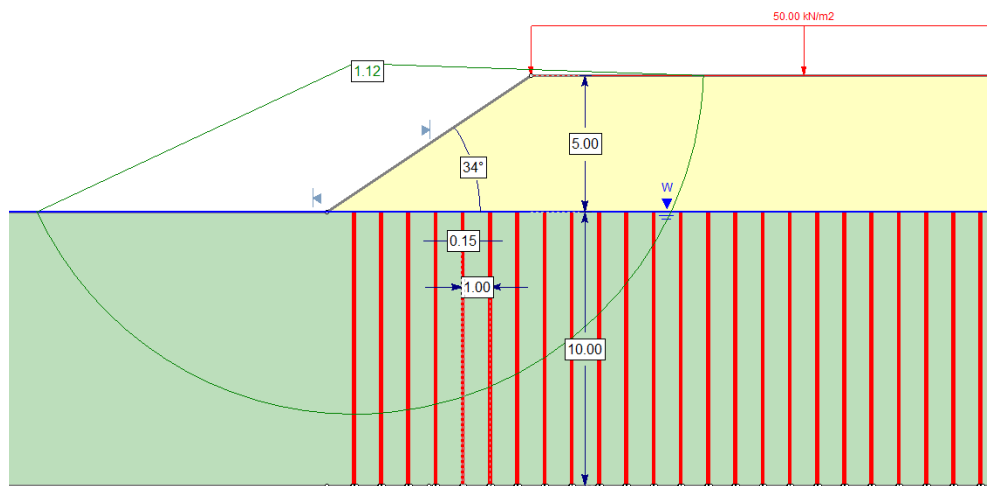
Fonte: Produção do próprio autor

5.3.2.2.3 Representação das colunas pelo modelo da coesão equivalente proposto por Raithel

A coesão equivalente proposta por Raithel pode ser obtida diretamente do *software* RingtracS mostrada na Figura 5.29, onde pode ser visto que tem magnitude igual a 145,18 kN/m².

Figura 5.32 - Análise da estabilidade global para o Estudo B com preenchimento de areia do Caso Material Preenchimento pelo método de Raithel considerando coesão equivalente.

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Cohesion Type	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Aterro	Yellow	19	Mohr-Coulomb	20	30		Water Surface	Custom	1	
Solo Mole	Green	16	Undrained	15		Constant	None			0
Coluna Granular com Coesão Equivalente	Red	20	Mohr-Coulomb	145.18	40		Water Surface	Custom	1	



Fonte: Produção do próprio autor

5.3.2.2.4 Representação das colunas pelo modelo do ângulo de atrito interno efetivo equivalente proposto por Raithel

Primeiramente, calcula-se o coeficiente de empuxo ativo:

$$K_{a,c} = \frac{1 - \sin \phi'_c}{1 + \sin \phi'_c} = \frac{1 - \sin 40^\circ}{1 + \sin 40^\circ}$$

$$K_{a,c} = 0,22$$

Considerando um ponto no meio da camada de argila e adotando o valor do acréscimo de tensão vertical sobre a coluna obtido com o resultado do *software* RingtracS, calcula-se o acréscimo da tensão horizontal atuante nas colunas:

$$\Delta\sigma_{h,c} = \Delta\sigma_{v,c} \cdot K_{a,c} + \sigma_{v,0,c} \cdot K_{a,c} = 774,18 \cdot 0,22 + \left(\frac{1}{2} \cdot 20 \cdot 10\right) \cdot 0,22$$

$$\Delta\sigma_{h,c} = 192,32 \text{ kN/m}$$

Sendo o raio do geossintético e sua deformação máxima dados, respectivamente, por:

$$r_{\text{geo}} = \Delta r_{\text{geo}} + r_{\text{geo},0}$$

$$\varepsilon_{\text{geo,max}} = \frac{\Delta r_{\text{geo}}}{r_{\text{geo}}}$$

tem-se o valor do raio do geossintético a partir do valor da deformação máxima do geossintético obtido com o resultado do *software* RingtracS :

$$r_{\text{geo}} = \frac{r_{\text{geo},0}}{1 - \varepsilon_{\text{geo,max}}} = \frac{0,40}{1 - 0,0307}$$

$$r_{\text{geo}} = 0,4127 \text{ m}$$

A partir do valor do raio do geossintético e da força mobilizada nele obtida pelo *software* RingtracS, calcula-se a tensão horizontal no geossintético:

$$\Delta\sigma_{h,\text{geo}} = \frac{T_{\text{geo}}}{r_{\text{geo}}} = \frac{54,16}{0,4127}$$

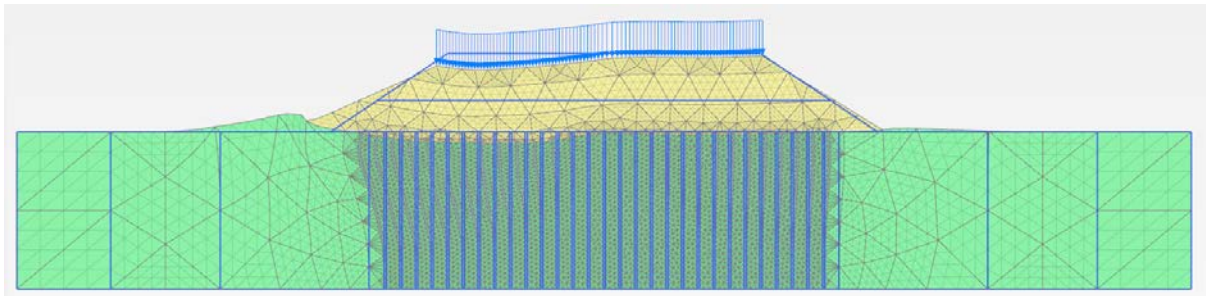
$$\Delta\sigma_{h,\text{geo}} = 131,23 \text{ kN/m}$$

Finalmente, torna-se possível calcular o ângulo de atrito interno efetivo equivalente:

$$\text{sen } \varphi'_{c,\text{eq}} = \frac{\frac{1 + \text{sen } \varphi'_c + \frac{\Delta\sigma_{h,\text{geo}}}{\Delta\sigma_{h,c}} - 1}{1 - \text{sen } \varphi'_c - \frac{\Delta\sigma_{h,\text{geo}}}{\Delta\sigma_{h,c}} + 1}}{\frac{1 + \text{sen } 40^\circ + \frac{131,23}{192,32} - 1}{1 - \text{sen } 40^\circ - \frac{131,23}{192,32} + 1}} = \frac{1 + \text{sen } 40^\circ + \frac{131,23}{192,32} - 1}{1 - \text{sen } 40^\circ - \frac{131,23}{192,32} + 1}$$

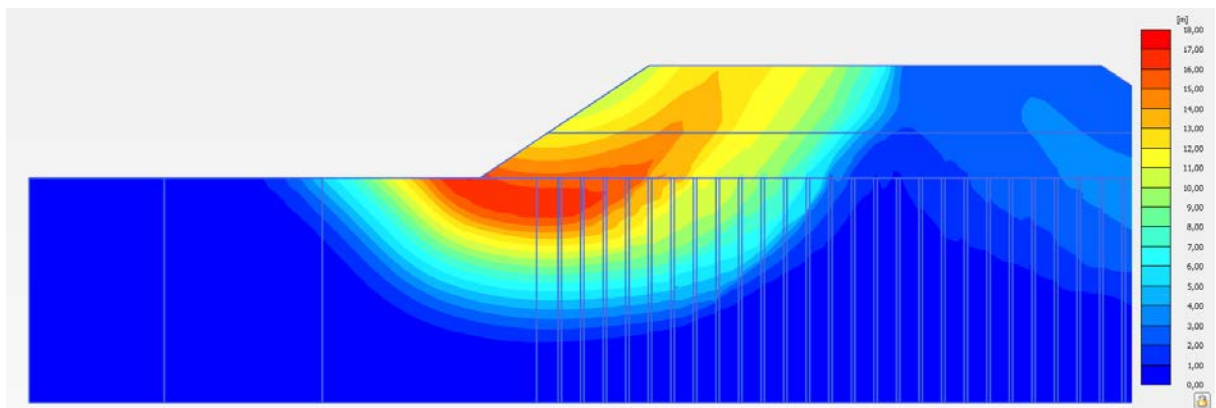
$$\varphi'_{c,\text{eq}} = 60,4^\circ$$

Figura 5.33 – Malha de elementos finitos e demonstração do deslocamento do maciço de solo após ruptura para o Estudo B com preenchimento de areia do Caso Material Preenchimento.



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 5.34 – Deslocamentos totais proveniente da análise de estabilidade global do Estudo B com preenchimento de areia do Caso Material Preenchimento pelo método dos elementos finitos.



Fonte: Produção do próprio autor

A análise por elementos finitos para o Estudo B com preenchimento de areia do Caso Material Preenchimento apresentou $FS = 1,40$.

5.3.3 Estudo C com preenchimento de areia

5.3.3.1 Dimensionamento do geotêxtil

Fazendo-se uso do *software* RingtracS, adotou-se a magnitude do módulo de rigidez do geotêxtil igual ao valor obtido com o dimensionamento para o Estudo A com preenchimento de areia do Caso Material Preenchimento: 3500 kN/m (Ringtrac 100/200 MP); enquanto que os parâmetros do material de preenchimento foram os mesmos adotados no Estudo B. Dentre outros resultados, o *software* gera em sua saída a magnitude das tensões atuantes no topo das colunas ($\sigma_{v,c}$) e no topo do solo mole ($\sigma_{v,s}$), como pode ser visto na figura a seguir.

Figura 5.35 - Resultados do dimensionamento do geotêxtil para o Estudo C com preenchimento de areia do Caso Material Preenchimento no *software* RingtracS.

Result for 100/200 PM area ratio 15%

Number of analysed slices	20
Axial spacing in triangular pattern	1.97 m
Design value of mobilized ring force	81.19 kN/m
Available design strength in ring direction	108.23 kN/m
Degree of use (1/f)	0.75

Dead load steps

Total load steps

Print Report

	Dead loads	Total loads
Pressure on top of columns	562.48 kN/m ²	831.08 kN/m ²
Pressure on top of soft soil	12.50 kN/m ²	23.93 kN/m ²
Efficiency of columns	0.89	0.86
Load on column top	282.73 kN	417.75 kN
Total settlement	0.23 m	0.33 m
Maximum ring strain	1.85 %	2.66 %
Mobilized ring force	43.53 kN/m	62.45 kN/m
Added embankment height	0.00 m	0.00 m
Equivalent cohesion	116.70 kN/m ²	167.41 kN/m ²

Fonte: Produção do próprio autor

A partir da figura, para o Estudo C com preenchimento de areia para o Caso Material Preenchimento, observa-se que:

- A resistência disponível na direção perimetral do geotêxtil vale 108,23 kN/m sendo superior à força mobilizada no encamisamento que apresenta resultado igual a 81,19 kN/m, portanto este geotêxtil resiste às solicitações;
- O geotêxtil Ringtrac 100/200 PM adotado apresenta módulo de rigidez nominal igual a 3500 kN/m, resistência à tração nominal igual a 100 kN/m na direção longitudinal e igual a 200 kN/m na direção perimetral e deformação na resistência nominal de 6% no sentido transversal;

- As tensões atuantes no topo das colunas ($\sigma_{v,c}$) foram de 831,08 kN/m², enquanto que as atuantes no topo do solo mole ($\sigma_{v,s}$) apresentam valor igual a 23,93 kN/m², resultando em uma eficiência das colunas de 86%;
- O dimensionamento indicou deformação máxima no reforço ($\epsilon_{geo,max}$) de 2,66%;
- A tração mobilizada no reforço geossintético (T_{geo}) foi de 62,45 kN/m, resultando em uma coesão equivalente pelo método de Raithel (c_{eq}) igual a 167,41 kN/m².

5.3.3.2 Análises de estabilidade global

5.3.3.2.1 Representação das colunas pelo método de Priebe considerando área equivalente

Pelo ábaco da Figura 3.7, o fator de melhoria (n) tem valor igual a 1,65 para os parâmetros adotados. Dessa forma, torna-se possível calcular o fator reduzido de concentração de tensões na coluna (recomendado).

$$m^* = \frac{n - 1}{n} = \frac{1,65 - 1}{1,65}$$

$$m^* = 0,39$$

Com esse fator, obtêm-se os parâmetros do solo equivalente:

$$\tan \varphi'_m = m^* \cdot \tan \varphi'_c + (1 - m^*) \cdot \tan \varphi'_s = 0,39 \cdot \tan 34^\circ + (1 - 0,39) \cdot \tan 30^\circ$$

$$\varphi'_m = 31,6^\circ$$

$$c'_m{}^* = (1 - m^*) \cdot c'_s = (1 - 0,39) \cdot 3,5$$

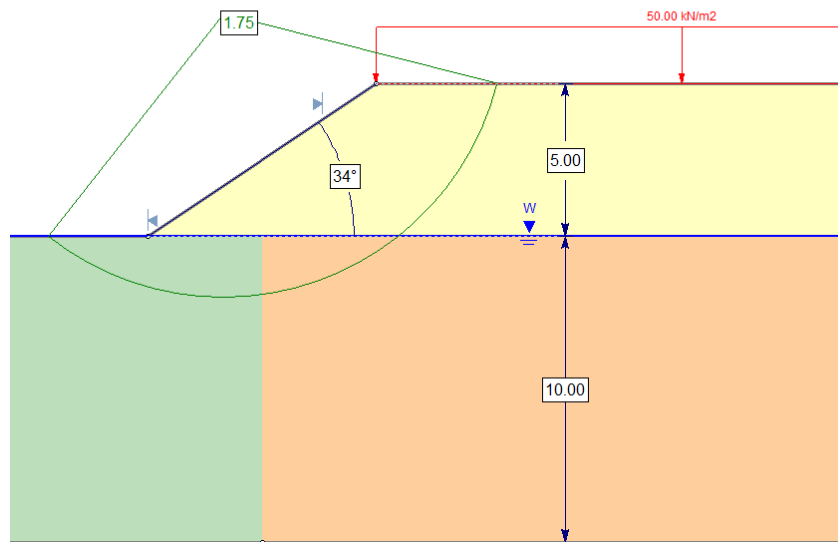
$$c'_m{}^* = 2,13 \text{ kPa}$$

$$\gamma_m = \gamma_c \cdot a_E + \gamma_s \cdot (1 - a_E) = 20 \cdot 0,15 + 16 \cdot (1 - 0,15)$$

$$\gamma_m = 16,6 \text{ kN/m}^3$$

Figura 5.36 - Análise da estabilidade global do Estudo C com preenchimento de areia do Caso Material Preenchimento pelo método de Priebe considerando área equivalente.

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Cohesion Type	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Aterro		19	Mohr-Coulomb	20	30		Water Surface	Custom	1	
Solo Mole		16	Undrained	25		Constant	None			0
Solo Melhorado		16.6	Mohr-Coulomb	2.13	31.6		Water Surface	Custom	1	

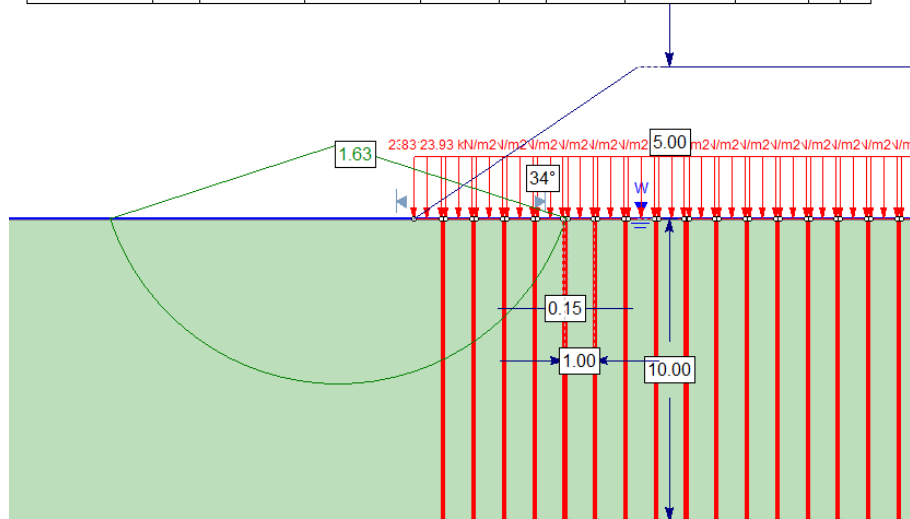


Fonte: Produção do próprio autor

5.2.3.2.2 Representação das colunas pelo método adaptado de Priebe considerando modelo das cargas concentradas

Figura 5.37 - Análise da estabilidade global do Estudo C com preenchimento de areia do Caso Material Preenchimento pelo método adaptado de Priebe considerando cargas concentradas.

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Cohesion Type	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Coluna Granular		20	Mohr-Coulomb	0	40		Water Surface	Custom	1	
Solo Mole		16	Undrained	15		Constant	None			0



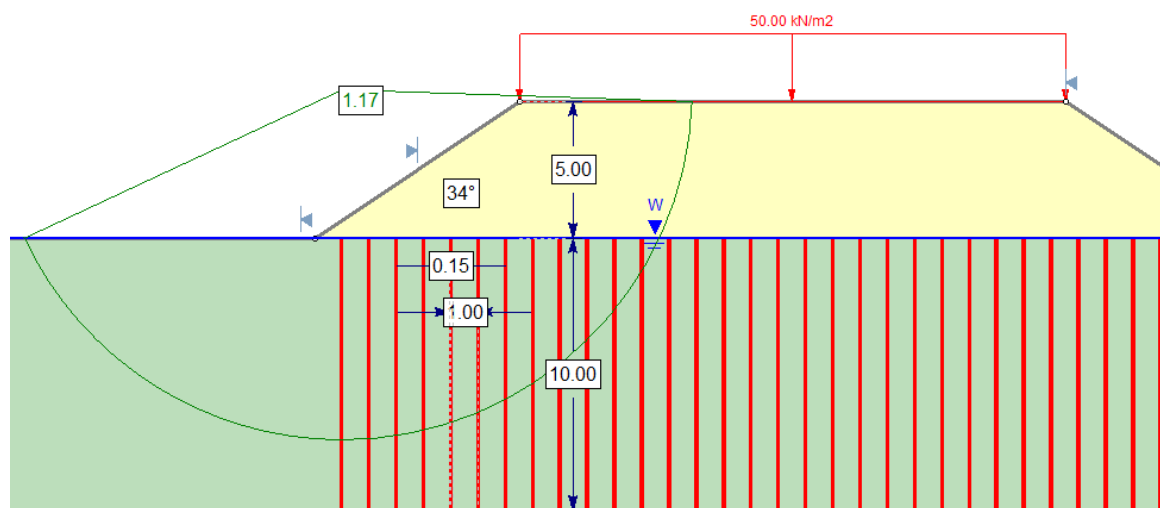
Fonte: Produção do próprio autor

5.3.3.2.3 Representação das colunas pelo modelo da coesão equivalente proposto por Raithel

A coesão equivalente proposta por Raithel pode ser obtida diretamente do *software* RingtracS mostrada na Figura 5.35, onde pode ser visto que tem magnitude igual a 167,41 kN/m².

Figura 5.38 - Análise da estabilidade global do Estudo C com preenchimento de areia do Caso Material Preenchimento pelo método de Raithel considerando coesão equivalente.

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Cohesion Type	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Aterro	■	19	Mohr-Coulomb	20	30		Water Surface	Custom	1	
Solo Mole	■	16	Undrained	15		Constant	None			0
Coluna Granular com Coesão Equivalente	■	20	Mohr-Coulomb	167.41	40		Water Surface	Custom	1	



Fonte: Produção do próprio autor

5.3.4 Estudo A com preenchimento de brita

5.3.4.1 Dimensionamento do geotêxtil

Fazendo-se uso do *software* RingtracS, primeiramente, foi possível determinar a resistência disponível do geotêxtil mínima necessária, ou seja, quando esta atingia valor maior ou igual à força mobilizada no encamisamento. Dentre outros resultados, o *software* gera em sua saída a magnitude das tensões atuantes no topo das colunas ($\sigma_{v,c}$) e no topo do solo mole ($\sigma_{v,s}$), como pode ser visto na figura a seguir.

Figura 5.39 - Resultados do dimensionamento do geotêxtil para o Estudo A com preenchimento de brita do Caso Material Preenchimento no *software* RingtracS.

Result for 100/300 PM area ratio 15%

Number of analysed slices	20	Dead loads	Total loads
Axial spacing in triangular pattern	1.97 m	Pressure on top of columns	544.19 kN/m ² 794.04 kN/m ²
Design value of mobilized ring force	133.73 kN/m	Pressure on top of soft soil	15.73 kN/m ² 30.46 kN/m ²
Available design strength in ring direction	139.15 kN/m	Efficiency of columns	0.86 0.82
Degree of use (1/f)	0.96	Load on column top	273.54 kN 399.13 kN
Dead load steps Total load steps		Total settlement	0.25 m 0.35 m
Print Report		Maximum ring strain	2.06 % 2.92 %
		Mobilized ring force	72.53 kN/m 102.87 kN/m
		Added embankment height	0.00 m 0.00 m
		Equivalent cohesion	150.89 kN/m ² 214.00 kN/m ²

Fonte: Produção do próprio autor

A partir da figura, para o Estudo A com preenchimento de brita do Caso Material Preenchimento, observa-se que:

- A resistência disponível na direção perimetral do geotêxtil vale 139,15 kN/m sendo superior à força mobilizada no encamisamento que apresenta resultado igual a 133,73 kN/m, portanto este geotêxtil resiste às solicitações, sendo o de menor resistência possível para o caso (maior economia);
- O geotêxtil Ringtrac 100/300 PM adotado apresenta módulo de rigidez nominal igual a 4900 kN/m, resistência à tração nominal igual a 100 kN/m na direção longitudinal e igual a 300 kN/m na direção perimetral e deformação na resistência nominal de 6% no sentido transversal;

- As tensões atuantes no topo das colunas ($\sigma_{v,c}$) foram de 794,04 kN/m², enquanto que as atuantes no topo do solo mole ($\sigma_{v,s}$) apresentam valor igual a 30,46 kN/m², resultando em uma eficiência das colunas de 82%;
- O dimensionamento indicou deformação máxima no reforço ($\epsilon_{geo,max}$) de 2,92%;
- A tração mobilizada no reforço geossintético (T_{geo}) foi de 102,87 kN/m, resultando em uma coesão equivalente pelo método de Raithel (c_{eq}) igual a 214,00 kN/m².

5.3.4.2 Análises de estabilidade global

5.3.1.4.1 Representação das colunas pelo método de Priebe considerando área equivalente

Pelo ábaco da Figura 3.7, o fator de melhoria (n) tem valor igual a 1,50 para os parâmetros adotados. Dessa forma, torna-se possível calcular o fator reduzido de concentração de tensões na coluna (recomendado).

$$m^* = \frac{n - 1}{n} = \frac{1,50 - 1}{1,50}$$

$$m^* = 0,33$$

Com esse fator, obtêm-se os parâmetros do solo equivalente:

$$\tan \varphi'_m = m^* \cdot \tan \varphi'_c + (1 - m^*) \cdot \tan \varphi'_s = 0,33 \cdot \tan 28^\circ + (1 - 0,33) \cdot \tan 24^\circ$$

$$\varphi'_m = 25,3^\circ$$

$$c'_m = (1 - m^*) \cdot c'_s = (1 - 0,33) \cdot 2,0$$

$$c'_m = 1,34 \text{ kPa}$$

$$\gamma_m = \gamma_c \cdot a_E + \gamma_s \cdot (1 - a_E) = 20 \cdot 0,15 + 16 \cdot (1 - 0,15)$$

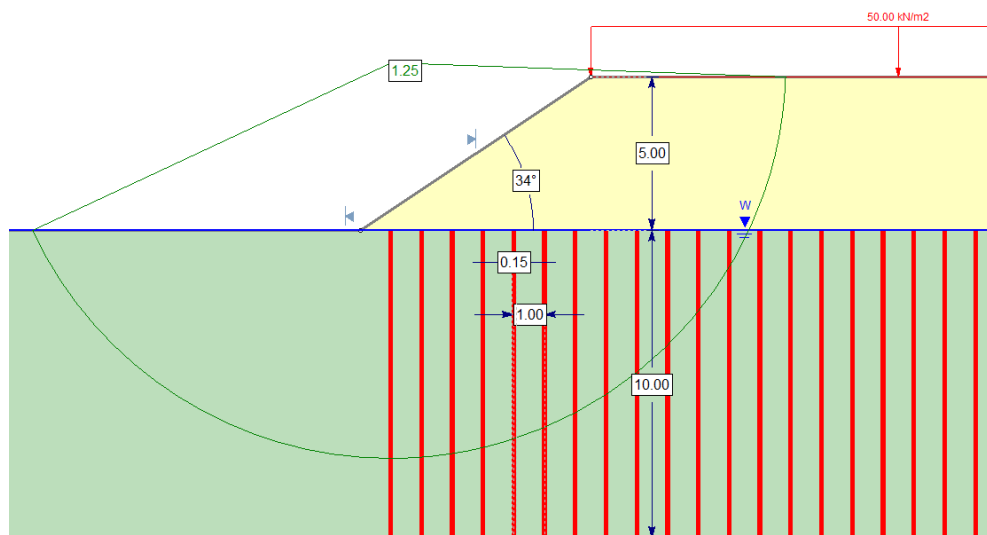
$$\gamma_m = 16,6 \text{ kN/m}^3$$

5.3.4.2.3 Representação das colunas pelo modelo da coesão equivalente proposto por Raithel

A coesão equivalente proposta por Raithel pode ser obtida diretamente do *software* RingtracS mostrada na Figura 5.39, onde pode ser visto que tem magnitude igual a 214,00 kN/m².

Figura 5.42 - Análise da estabilidade global para o Estudo A com preenchimento de brita do Caso Material Preenchimento pelo método de Raithel considerando coesão equivalente.

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Cohesion Type	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Aterro		19	Mohr-Coulomb	20	30		Water Surface	Custom	1	
Solo Mole		16	Undrained	15		Constant	None			0
Coluna Granular com Coesão Equivalente		20	Mohr-Coulomb	214	28		Water Surface	Custom	1	



Fonte: Produção do próprio autor

5.3.4.2.4 Representação das colunas pelo modelo do ângulo de atrito interno efetivo equivalente proposto por Raithel

Primeiramente, calcula-se o coeficiente de empuxo ativo:

$$K_{a,c} = \frac{1 - \sin \phi'_c}{1 + \sin \phi'_c} = \frac{1 - \sin 28^\circ}{1 + \sin 28^\circ}$$

$$K_{a,c} = 0,36$$

Considerando um ponto no meio da camada de argila e adotando o valor do acréscimo de tensão vertical sobre a coluna obtido com o resultado do *software* RingtracS, calcula-se o acréscimo da tensão horizontal atuante nas colunas:

$$\Delta\sigma_{h,c} = \Delta\sigma_{v,c} \cdot K_{a,c} + \sigma_{v,0,c} \cdot K_{a,c} = 794,04 \cdot 0,36 + \left(\frac{1}{2} \cdot 20 \cdot 10\right) \cdot 0,36$$

$$\Delta\sigma_{h,c} = 321,85 \text{ kN/m}$$

Sendo o raio do geossintético e sua deformação máxima dados, respectivamente, por:

$$r_{\text{geo}} = \Delta r_{\text{geo}} + r_{\text{geo},0}$$

$$\varepsilon_{\text{geo,max}} = \frac{\Delta r_{\text{geo}}}{r_{\text{geo}}}$$

tem-se o valor do raio do geossintético a partir do valor da deformação máxima do geossintético obtido com o resultado do *software* RingtracS :

$$r_{\text{geo}} = \frac{r_{\text{geo},0}}{1 - \varepsilon_{\text{geo,max}}} = \frac{0,40}{1 - 0,0292}$$

$$r_{\text{geo}} = 0,4120 \text{ m}$$

A partir do valor do raio do geossintético e da força mobilizada nele obtida pelo *software* RingtracS, calcula-se a tensão horizontal no geossintético:

$$\Delta\sigma_{h,\text{geo}} = \frac{T_{\text{geo}}}{r_{\text{geo}}} = \frac{102,87}{0,4120}$$

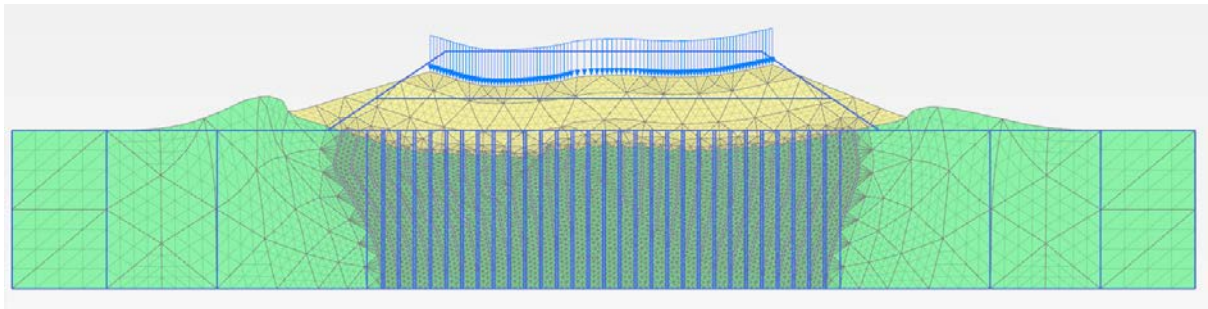
$$\Delta\sigma_{h,\text{geo}} = 249,68 \text{ kN/m}$$

Finalmente, torna-se possível calcular o ângulo de atrito interno efetivo equivalente:

$$\text{sen } \varphi'_{c,\text{eq}} = \frac{\frac{1 + \text{sen } \varphi'_c + \frac{\Delta\sigma_{h,\text{geo}}}{\Delta\sigma_{h,c}} - 1}{1 - \text{sen } \varphi'_c - \frac{\Delta\sigma_{h,\text{geo}}}{\Delta\sigma_{h,c}} + 1}}{\frac{1 + \text{sen } 28^\circ + \frac{249,68}{321,85} - 1}{1 - \text{sen } 28^\circ - \frac{249,68}{321,85} + 1}} = \frac{1 + \text{sen } 28^\circ + \frac{249,68}{321,85} - 1}{1 - \text{sen } 28^\circ - \frac{249,68}{321,85} + 1}$$

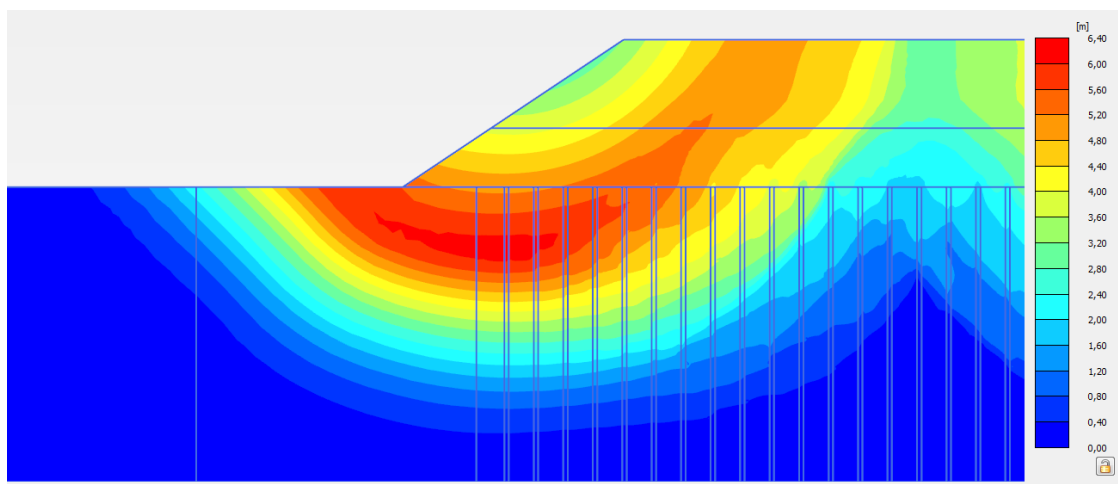
$$\varphi'_{c,\text{eq}} = 58,3^\circ$$

Figura 5.43 – Malha de elementos finitos e demonstração do deslocamento do maciço de solo após ruptura para o Estudo A com preenchimento de brita do Caso Material Preenchimento.



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 5.44 – Deslocamentos totais proveniente da análise de estabilidade global do Estudo A com preenchimento de brita do Caso Material Preenchimento pelo método dos elementos finitos.



Fonte: Produção do próprio autor

A análise por elementos finitos para o Estudo A com preenchimento de brita do Caso Material Preenchimento apresentou $FS = 1,38$.

5.3.5 Estudo B com preenchimento de brita

5.3.5.1 Dimensionamento do geotêxtil

Fazendo-se uso do *software* RingtracS, primeiramente, foi possível determinar a resistência disponível do geotêxtil mínima necessária, ou seja, quando esta atingia valor maior ou igual à força mobilizada no encamisamento. Dentre outros resultados, o *software* gera em sua saída a magnitude das tensões atuantes no topo das colunas ($\sigma_{v,c}$) e no topo do solo mole ($\sigma_{v,s}$), como pode ser visto na figura a seguir.

Figura 5.45 - Resultados do dimensionamento do geotêxtil para o Estudo B com preenchimento de brita do Caso Material Preenchimento no *software* RingtracS.

Result for 100/200 PM area ratio 15%

Number of analysed slices	20	Dead loads	Total loads
Axial spacing in triangular pattern	1.97 m	Pressure on top of columns	558.69 kN/m ² 825.26 kN/m ²
Design value of mobilized ring force	80.77 kN/m	Pressure on top of soft soil	13.17 kN/m ² 24.95 kN/m ²
Available design strength in ring direction	92.76 kN/m	Efficiency of columns	0.88 0.85
Degree of use (1/f)	0.87	Load on column top	280.83 kN 414.82 kN
Dead load steps Total load steps		Total settlement	0.21 m 0.30 m
Print Report		Maximum ring strain	1.85 % 2.64 %
		Mobilized ring force	43.53 kN/m 62.13 kN/m
		Added embankment height	0.00 m 0.00 m
		Equivalent cohesion	116.68 kN/m ² 166.55 kN/m ²

Fonte: Produção do próprio autor

A partir da figura, para o Estudo B com preenchimento de brita do Caso Material Preenchimento, observa-se que:

- A resistência disponível na direção perimetral do geotêxtil vale 92,76 kN/m sendo superior à força mobilizada no encamisamento que apresenta resultado igual a 80,77 kN/m, portanto este geotêxtil resiste às solicitações, sendo o de menor resistência possível para o caso (maior economia);
- O geotêxtil Ringtrac 100/200 PM adotado apresenta módulo de rigidez nominal igual a 3500 kN/m, resistência à tração nominal igual a 100 kN/m na direção longitudinal e igual a 200 kN/m na direção perimetral e deformação na resistência nominal de 6% no sentido transversal;

- As tensões atuantes no topo das colunas ($\sigma_{v,c}$) foram de 825,26 kN/m², enquanto que as atuantes no topo do solo mole ($\sigma_{v,s}$) apresentam valor igual a 24,95 kN/m², resultando em uma eficiência das colunas de 85%;
- O dimensionamento indicou deformação máxima no reforço ($\epsilon_{geo,max}$) de 2,64%;
- A tração mobilizada no reforço geossintético (T_{geo}) foi de 62,13 kN/m, resultando em uma coesão equivalente pelo método de Raithel (c_{eq}) igual a 166,55 kN/m².

5.3.5.2 Análises de estabilidade global

5.3.5.2.1 Representação das colunas pelo método de Priebe considerando área equivalente

Pelo ábaco da Figura 3.7, o fator de melhoria (n) tem valor igual a 1,8 para os parâmetros adotados. Dessa forma, torna-se possível calcular o fator reduzido de concentração de tensões na coluna (recomendado).

$$m^* = \frac{n - 1}{n} = \frac{1,8 - 1}{1,8}$$

$$m^* = 0,44$$

Com esse fator, obtêm-se os parâmetros do solo equivalente:

$$\tan \varphi'_m = m^* \cdot \tan \varphi'_c + (1 - m^*) \cdot \tan \varphi'_s = 0,44 \cdot \tan 40^\circ + (1 - 0,44) \cdot \tan 24^\circ$$

$$\varphi'_m = 31,7^\circ$$

$$c'_m = (1 - m^*) \cdot c'_s = (1 - 0,44) \cdot 2,0$$

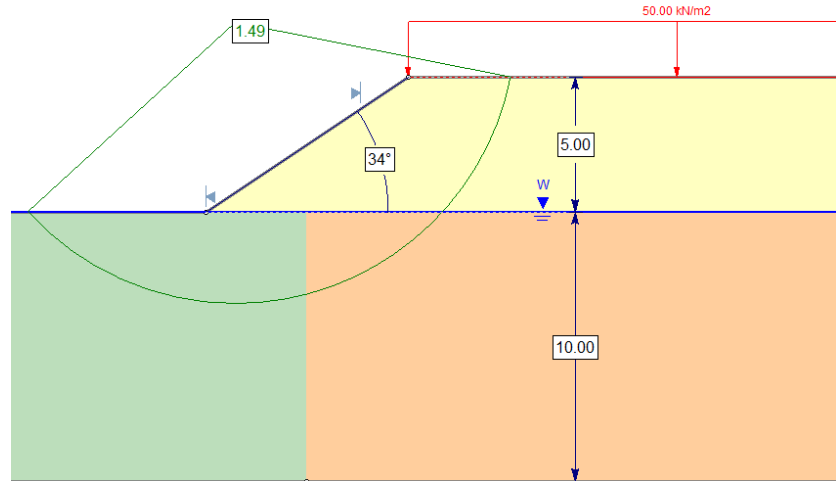
$$c'_m = 1,12 \text{ kPa}$$

$$\gamma_m = \gamma_c \cdot a_E + \gamma_s \cdot (1 - a_E) = 20 \cdot 0,15 + 16 \cdot (1 - 0,15)$$

$$\gamma_m = 16,6 \text{ kN/m}^3$$

Figura 5.46 - Análise da estabilidade global para o Estudo B com preenchimento de brita do Caso Material Preenchimento pelo método de Priebe considerando área equivalente.

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m3)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Cohesion Type	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Aterro		19	Mohr-Coulomb	20	30		Water Surface	Custom	1	
Solo Mole		16	Undrained	15		Constant	None			0
Solo Melhorado		16.6	Mohr-Coulomb	1.12	31.7		Water Surface	Custom	1	

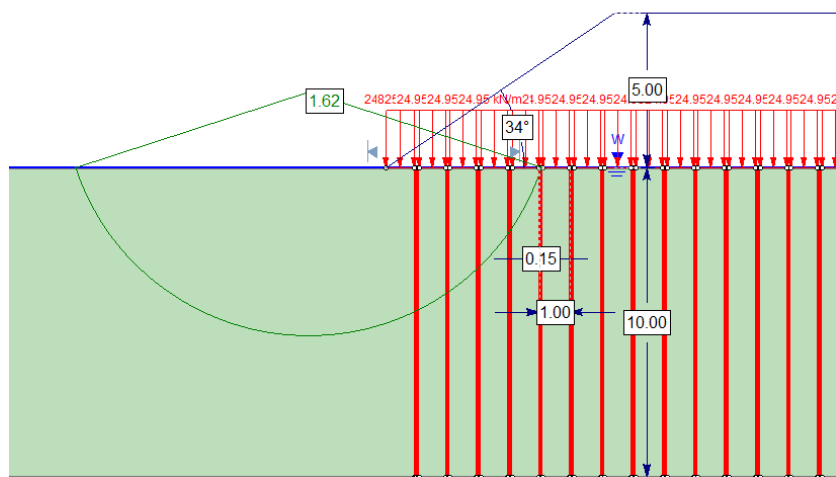


Fonte: Produção do próprio autor

5.3.5.2.2 Representação das colunas pelo método adaptado de Priebe considerando modelo das cargas concentradas

Figura 5.47 - Análise da estabilidade global para o Estudo B com preenchimento de brita do Caso Material Preenchimento pelo método adaptado de Priebe considerando cargas concentradas.

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m3)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Cohesion Type	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Coluna Granular		20	Mohr-Coulomb	0	40		Water Surface	Custom	1	
Solo Mole		16	Undrained	15		Constant	None			0



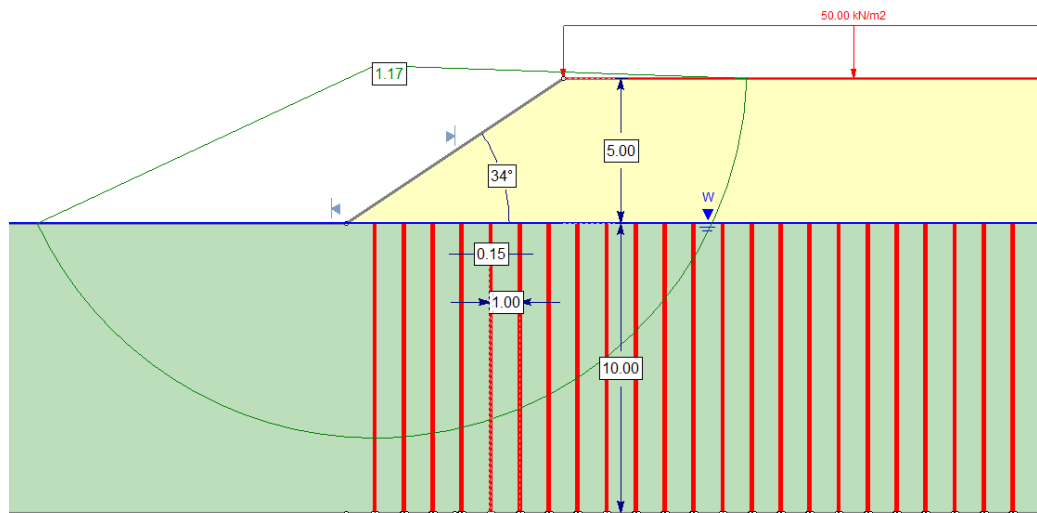
Fonte: Produção do próprio autor

5.3.5.2.3 Representação das colunas pelo modelo da coesão equivalente proposto por Raithel

A coesão equivalente proposta por Raithel pode ser obtida diretamente do *software* RingtracS mostrada na Figura 5.45, onde pode ser visto que tem magnitude igual a 166,55 kN/m².

Figura 5.48 - Análise da estabilidade global para o Estudo B com preenchimento de brita do Caso Material Preenchimento pelo método de Raithel considerando coesão equivalente.

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Cohesion Type	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Aterro	■	19	Mohr-Coulomb	20	30		Water Surface	Custom	1	
Solo Mole	■	16	Undrained	15		Constant	None			0
Coluna Granular com Coesão Equivalente	■	20	Mohr-Coulomb	166.55	40		Water Surface	Custom	1	



Fonte: Produção do próprio autor

5.3.5.2.4 Representação das colunas pelo modelo do ângulo de atrito interno efetivo equivalente proposto por Raithel

Primeiramente, calcula-se o coeficiente de empuxo ativo:

$$K_{a,c} = \frac{1 - \sin \phi'_c}{1 + \sin \phi'_c} = \frac{1 - \sin 40^\circ}{1 + \sin 40^\circ}$$

$$K_{a,c} = 0,22$$

Considerando um ponto no meio da camada de argila e adotando o valor do acréscimo de tensão vertical sobre a coluna obtido com o resultado do *software* RingtracS, calcula-se o acréscimo da tensão horizontal atuante nas colunas:

$$\Delta\sigma_{h,c} = \Delta\sigma_{v,c} \cdot K_{a,c} + \sigma_{v,0,c} \cdot K_{a,c} = 825,26 \cdot 0,22 + \left(\frac{1}{2} \cdot 20 \cdot 10\right) \cdot 0,22$$

$$\Delta\sigma_{h,c} = 203,56 \text{ kN/m}$$

Sendo o raio do geossintético e sua deformação máxima dados, respectivamente, por:

$$r_{\text{geo}} = \Delta r_{\text{geo}} + r_{\text{geo},0}$$

$$\varepsilon_{\text{geo,max}} = \frac{\Delta r_{\text{geo}}}{r_{\text{geo}}}$$

tem-se o valor do raio do geossintético a partir do valor da deformação máxima do geossintético obtido com o resultado do *software* RingtracS :

$$r_{\text{geo}} = \frac{r_{\text{geo},0}}{1 - \varepsilon_{\text{geo,max}}} = \frac{0,40}{1 - 0,0264}$$

$$r_{\text{geo}} = 0,4108 \text{ m}$$

A partir do valor do raio do geossintético e da força mobilizada nele obtida pelo *software* RingtracS, calcula-se a tensão horizontal no geossintético:

$$\Delta\sigma_{h,\text{geo}} = \frac{T_{\text{geo}}}{r_{\text{geo}}} = \frac{62,13}{0,4108}$$

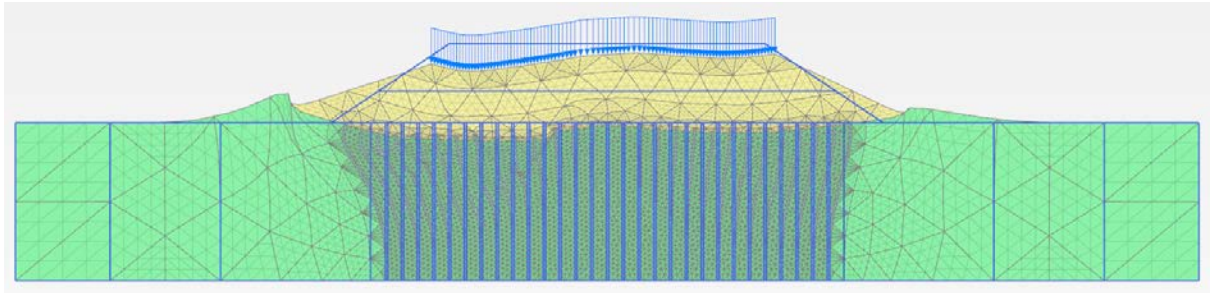
$$\Delta\sigma_{h,\text{geo}} = 151,24 \text{ kN/m}$$

Finalmente, torna-se possível calcular o ângulo de atrito interno efetivo equivalente:

$$\text{sen } \varphi'_{c,\text{eq}} = \frac{\frac{1 + \text{sen } \varphi'_c + \frac{\Delta\sigma_{h,\text{geo}}}{\Delta\sigma_{h,c}} - 1}{1 - \text{sen } \varphi'_c - \frac{\Delta\sigma_{h,\text{geo}}}{\Delta\sigma_{h,c}} + 1}}{\frac{1 + \text{sen } 40^\circ + \frac{151,24}{203,56} - 1}{1 - \text{sen } 40^\circ - \frac{151,24}{203,56} + 1}} = \frac{1 + \text{sen } 40^\circ + \frac{151,24}{203,56} - 1}{1 - \text{sen } 40^\circ - \frac{151,24}{203,56} + 1}$$

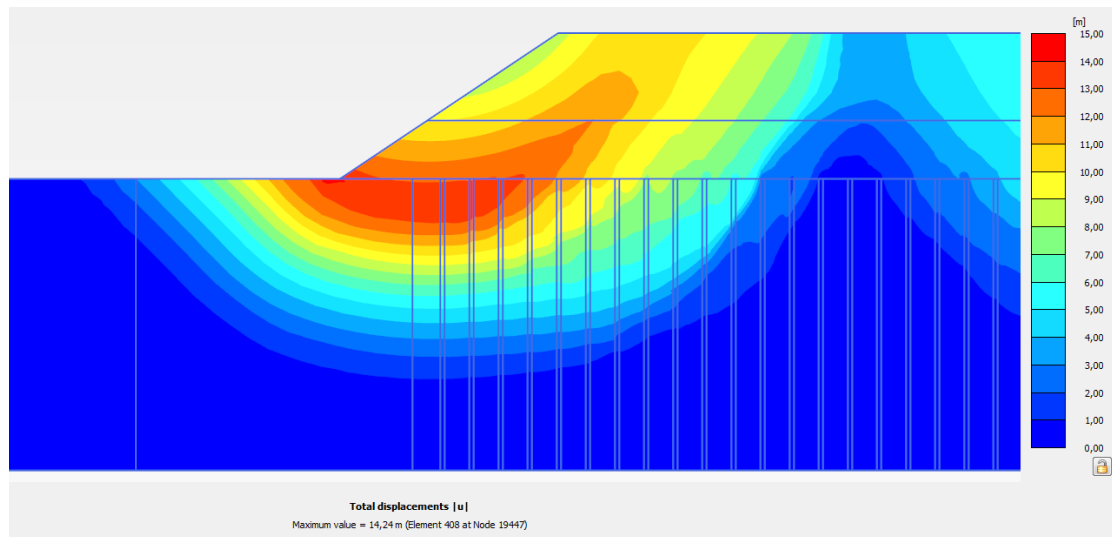
$$\varphi'_{c,\text{eq}} = 63,2^\circ$$

Figura 5.49 – Malha de elementos finitos e demonstração do deslocamento do maciço de solo após ruptura para o Estudo B com preenchimento de brita do Caso Material Preenchimento.



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 5.50 – Deslocamentos totais proveniente da análise de estabilidade global do Estudo B com preenchimento de brita do Caso Material Preenchimento pelo método dos elementos finitos.



Fonte: Produção do próprio autor

A análise por elementos finitos para o Estudo B com preenchimento de brita do Caso Material Preenchimento apresentou $FS = 1,44$.

5.3.6 Estudo C com preenchimento de brita

5.3.6.1 Dimensionamento do geotêxtil

Fazendo-se uso do *software* RingtracS, adotou-se a magnitude do módulo de rigidez do geotêxtil igual ao valor obtido com o dimensionamento para o Estudo A com preenchimento de brita do Caso Material Preenchimento: 4900 kN/m (Ringtrac 100/300 MP); enquanto que os parâmetros do material de preenchimento foram os mesmos adotados no Estudo B. Dentre outros resultados, o *software* gera em sua saída a magnitude das tensões atuantes no topo das colunas ($\sigma_{v,c}$) e no topo do solo mole ($\sigma_{v,s}$), como pode ser visto na figura a seguir.

Figura 5.51 - Resultados do dimensionamento do geotêxtil para o Estudo C com preenchimento de brita do Caso Material Preenchimento no *software* RingtracS.

Result for 100/300 PM area ratio 15%			
Number of analysed slices		20	
Axial spacing in triangular pattern		1.97 m	
Design value of mobilized ring force		91.50 kN/m	
Available design strength in ring direction		139.15 kN/m	
Degree of use (1/f)		0.66	
Dead load steps Total load steps Print Report			
		Dead loads	Total loads
Pressure on top of columns		587.79 kN/m ²	882.01 kN/m ²
Pressure on top of soft soil		8.04 kN/m ²	14.94 kN/m ²
Efficiency of columns		0.93	0.91
Load on column top		295.46 kN	443.34 kN
Total settlement		0.17 m	0.25 m
Maximum ring strain		1.35 %	2.00 %
Mobilized ring force		47.46 kN/m	70.38 kN/m
Added embankment height		0.00 m	0.00 m
Equivalent cohesion		127.23 kN/m ²	188.67 kN/m ²

Fonte: Produção do próprio autor

A partir da figura, para o Estudo C com preenchimento de brita do Caso Material Preenchimento, observa-se que:

- A resistência disponível na direção perimetral do geotêxtil vale 139,15 kN/m sendo superior à força mobilizada no encamisamento que apresenta resultado igual a 91,50 kN/m, portanto este geotêxtil resiste às solicitações;
- O geotêxtil Ringtrac 100/300 PM adotado apresenta módulo de rigidez nominal igual a 4900 kN/m e resistência à tração nominal igual a 100 kN/m na direção longitudinal e igual a 300 kN/m na direção perimetral e deformação na resistência nominal de 6% no sentido transversal;

- As tensões atuantes no topo das colunas ($\sigma_{v,c}$) foram de 882,01 kN/m², enquanto que as atuantes no topo do solo mole ($\sigma_{v,s}$) apresentam valor igual a 14,94 kN/m², resultando em uma eficiência das colunas de 91%;
- O dimensionamento indicou deformação máxima no reforço ($\epsilon_{geo,max}$) de 2,00%;
- A tração mobilizada no reforço geossintético (T_{geo}) foi de 70,38 kN/m, resultando em uma coesão equivalente pelo método de Raithel (c_{eq}) igual a 188,67 kN/m².

5.3.6.2 Análises de estabilidade global

5.3.6.2.1 Representação das colunas pelo método de Priebe considerando área equivalente

Pelo ábaco da Figura 3.7, o fator de melhoria (n) tem valor igual a 1,65 para os parâmetros adotados. Dessa forma, torna-se possível calcular o fator reduzido de concentração de tensões na coluna (recomendado).

$$m^* = \frac{n - 1}{n} = \frac{1,65 - 1}{1,65}$$

$$m^* = 0,39$$

Com esse fator, obtêm-se os parâmetros do solo equivalente:

$$\tan \varphi'_m = m^* \cdot \tan \varphi'_c + (1 - m^*) \cdot \tan \varphi'_s = 0,39 \cdot \tan 34^\circ + (1 - 0,39) \cdot \tan 30^\circ$$

$$\varphi'_m = 31,6^\circ$$

$$c'_m{}^* = (1 - m^*) \cdot c'_s = (1 - 0,39) \cdot 3,5$$

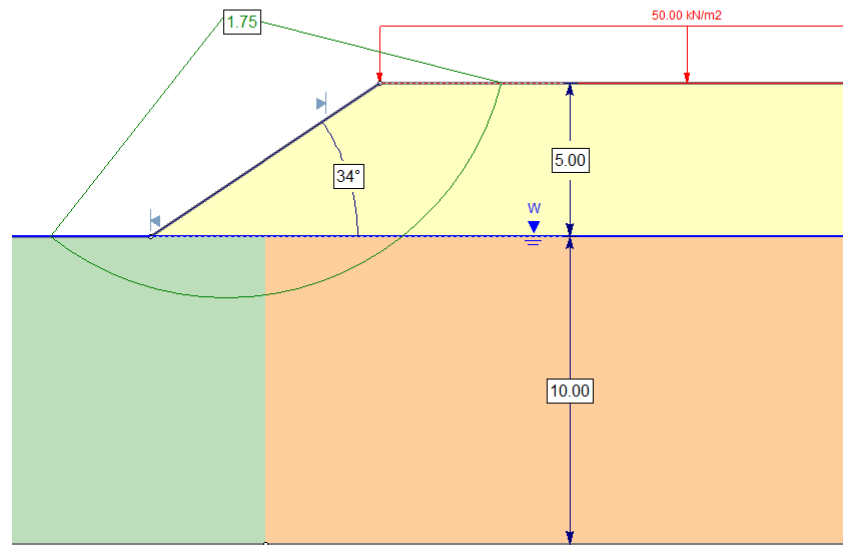
$$c'_m{}^* = 2,13 \text{ kPa}$$

$$\gamma_m = \gamma_c \cdot a_E + \gamma_s \cdot (1 - a_E) = 20 \cdot 0,15 + 16 \cdot (1 - 0,15)$$

$$\gamma_m = 16,6 \text{ kN/m}^3$$

Figura 5.52 - Análise da estabilidade global do Estudo C com preenchimento de brita do Caso Material Preenchimento pelo método de Priebe considerando área equivalente.

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m3)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Cohesion Type	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Aterro		19	Mohr-Coulomb	20	30		Water Surface	Custom	1	
Solo Mole		16	Undrained	25		Constant	None			0
Solo Melhorado		16.6	Mohr-Coulomb	2.13	31.6		Water Surface	Custom	1	

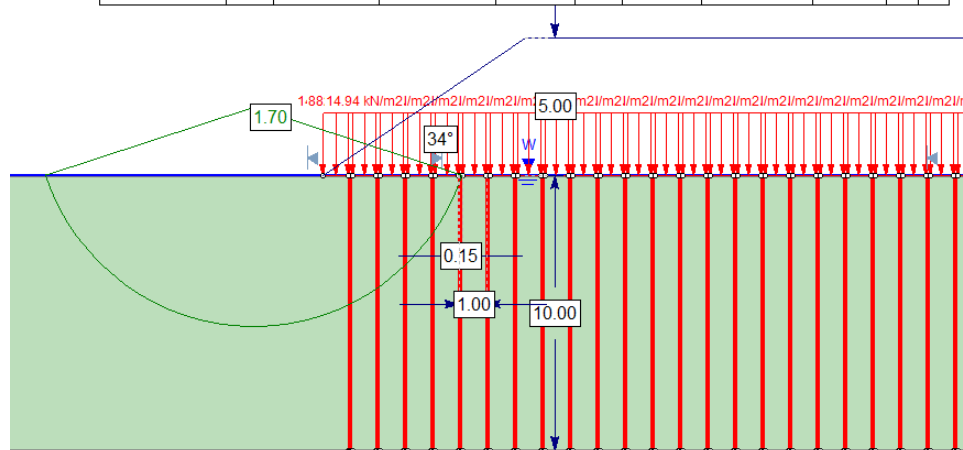


Fonte: Produção do próprio autor

5.3.6.2.2 Representação das colunas pelo método adaptado de Priebe considerando modelo das cargas concentradas

Figura 5.53 - Análise da estabilidade global do Estudo C com preenchimento de brita do Caso Material Preenchimento pelo método adaptado de Priebe considerando cargas concentradas.

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m3)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Cohesion Type	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Coluna Granular		20	Mohr-Coulomb	0	40		Water Surface	Custom	1	
Solo Mole		16	Undrained	15		Constant	None			0

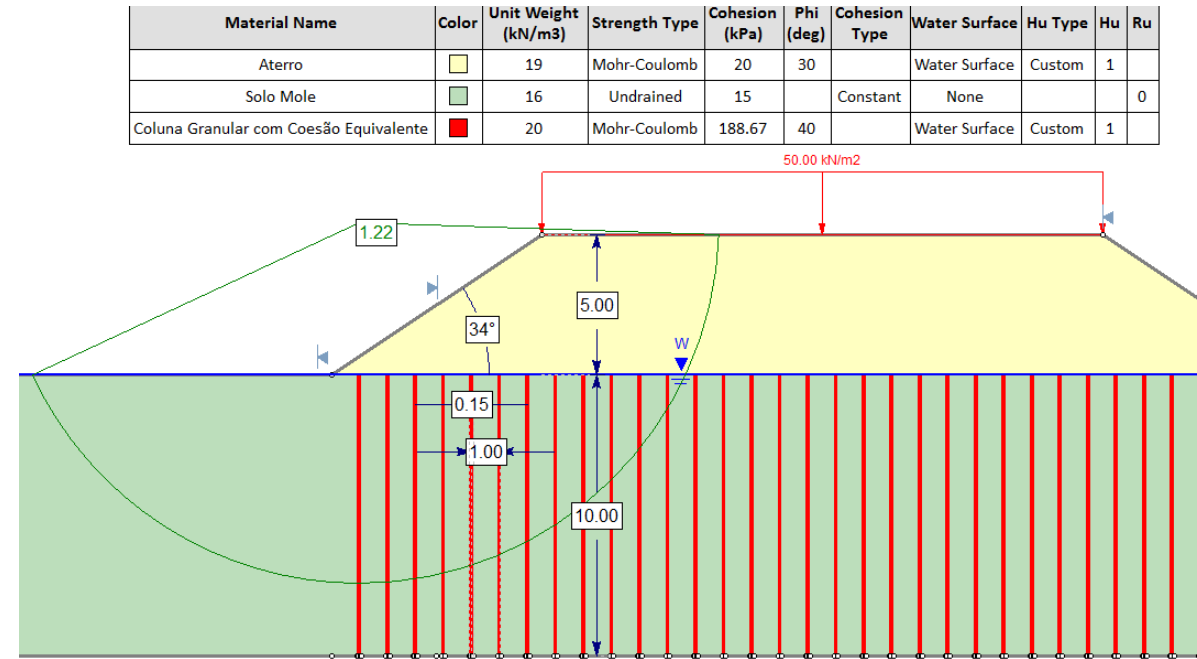


Fonte: Produção do próprio autor

5.3.6.2.3 Representação das colunas pelo modelo da coesão equivalente proposto por Raithel

A coesão equivalente proposta por Raithel pode ser obtida diretamente do *software* RingtracS mostrada na Figura 5.51, onde pode ser visto que tem magnitude igual a 188,67 kN/m².

Figura 5.54 - Análise da estabilidade global do Estudo C com preenchimento de brita do Caso Material Preenchimento pelo método de Raithel considerando coesão equivalente.



Fonte: Produção do próprio autor

5.4 CASO TAXA COBERTURA

5.4.1 Estudo A

5.4.1.1 Dimensionamento do geotêxtil

Fazendo-se uso do *software* RingtracS, primeiramente, foi possível determinar a resistência disponível do geotêxtil mínima necessária, ou seja, quando esta atinja valor maior ou igual à força mobilizada no encamisamento. Dentre outros resultados, o *software* gera em sua saída a magnitude das tensões atuantes no topo das colunas ($\sigma_{v,c}$) e no topo do solo mole ($\sigma_{v,s}$), como pode ser visto na figura a seguir.

Figura 5.55 - Resultados do dimensionamento do geotêxtil para o Estudo A do Caso Taxa Cobertura no *software* RingtracS.

Result for 100/400 PM area ratio 10%

Number of analysed slices	20	Dead loads	Total loads
Axial spacing in triangular pattern	2.41 m	Pressure on top of columns	833.71 kN/m ² 1,226.13 kN/m ²
Design value of mobilized ring force	168.23 kN/m	Pressure on top of soft soil	12.92 kN/m ² 24.87 kN/m ²
Available design strength in ring direction	185.53 kN/m	Efficiency of columns	0.88 0.85
Degree of use (1/f)	0.91	Load on column top	419.07 kN 616.32 kN
Dead load steps Total load steps		Total settlement	0.24 m 0.34 m
Print Report		Maximum ring strain	1.91 % 2.75 %
		Mobilized ring force	89.50 kN/m 129.41 kN/m
		Added embankment height	0.00 m 0.00 m
		Equivalent cohesion	210.41 kN/m ² 304.22 kN/m ²

Fonte: Produção do próprio autor

A partir da figura, para o Estudo A do Caso Taxa Cobertura, observa-se que:

- A resistência disponível na direção perimetral do geotêxtil vale 185,53 kN/m sendo superior à força mobilizada no encamisamento que apresenta resultado igual a 168,23 kN/m, portanto este geotêxtil resiste às solicitações, sendo o de menor resistência possível para o caso (maior economia);
- O geotêxtil Ringtrac 100/400 PM adotado apresenta módulo de rigidez nominal igual a 6500 kN/m, resistência à tração nominal igual a 100 kN/m na direção

longitudinal e igual a 400 kN/m na direção perimetral e deformação na resistência nominal de 6% no sentido transversal;

- As tensões atuantes no topo das colunas ($\sigma_{v,c}$) foram de 1226,13 kN/m², enquanto que as atuantes no topo do solo mole ($\sigma_{v,s}$) apresentam valor igual a 24,87 kN/m², resultando em uma eficiência das colunas de 85%;
- O dimensionamento indicou deformação máxima no reforço ($\epsilon_{geo,max}$) de 2,75%;
- A tração mobilizada no reforço geossintético (T_{geo}) foi de 129,41 kN/m, resultando em uma coesão equivalente pelo método de Raithel (c_{eq}) igual a 304,22 kN/m².

5.4.1.2 Análises de estabilidade global

5.4.1.2.1 Representação das colunas pelo método de Priebe considerando área equivalente

Pelo ábaco da Figura 3.7, o fator de melhoria (n) tem valor igual a 1,4 para os parâmetros adotados. Dessa forma, torna-se possível calcular o fator reduzido de concentração de tensões na coluna (recomendado).

$$m^* = \frac{n - 1}{n} = \frac{1,4 - 1}{1,4}$$

$$m^* = 0,29$$

Com esse fator, obtêm-se os parâmetros do solo equivalente:

$$\tan \varphi'_m = m^* \cdot \tan \varphi'_c + (1 - m^*) \cdot \tan \varphi'_s = 0,29 \cdot \tan 34^\circ + (1 - 0,29) \cdot \tan 24^\circ$$

$$\varphi'_m = 27,1^\circ$$

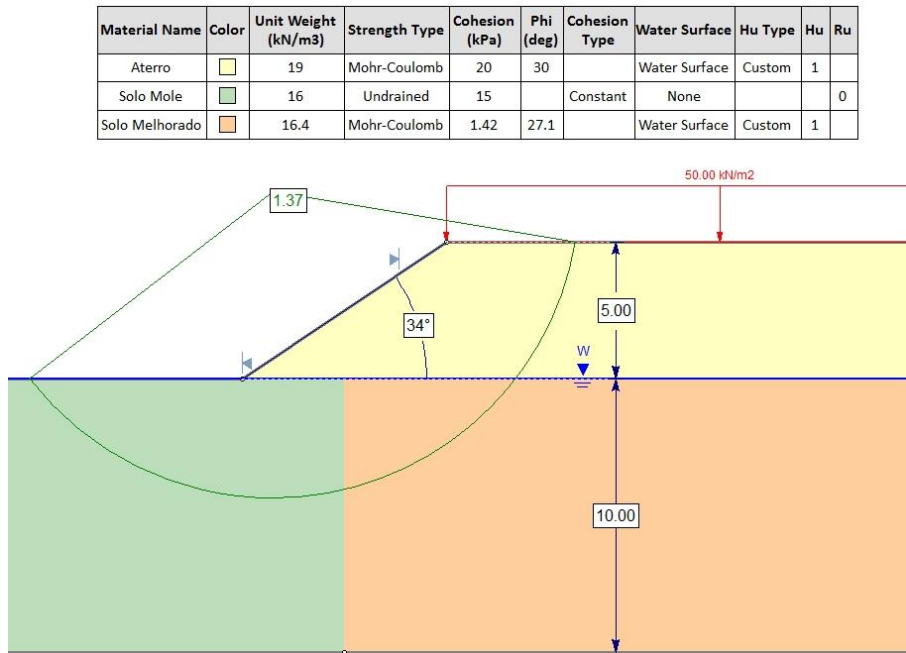
$$c'_m = (1 - m^*) \cdot c'_s = (1 - 0,29) \cdot 2$$

$$c'_m = 1,42 \text{ kPa}$$

$$\gamma_m = \gamma_c \cdot a_E + \gamma_s \cdot (1 - a_E) = 20 \cdot 0,10 + 16 \cdot (1 - 0,10)$$

$$\gamma_m = 16,4 \text{ kN/m}^3$$

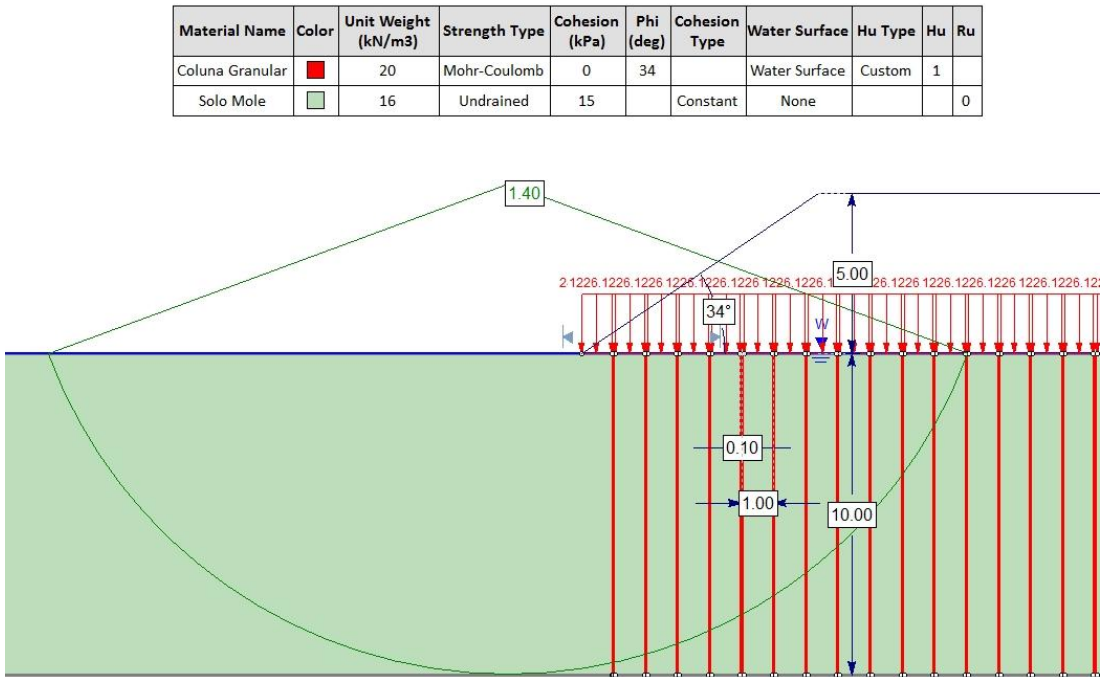
Figura 5.56 - Análise da estabilidade global do Estudo A do Caso Taxa Cobertura pelo método de Priebe considerando área equivalente.



Fonte: Produção do próprio autor

5.4.1.2.2 Representação das colunas pelo método adaptado de Priebe considerando modelo das cargas concentradas

Figura 5.57 - Análise da estabilidade global do Estudo A do Caso Taxa Cobertura pelo método adaptado de Priebe considerando cargas concentradas.



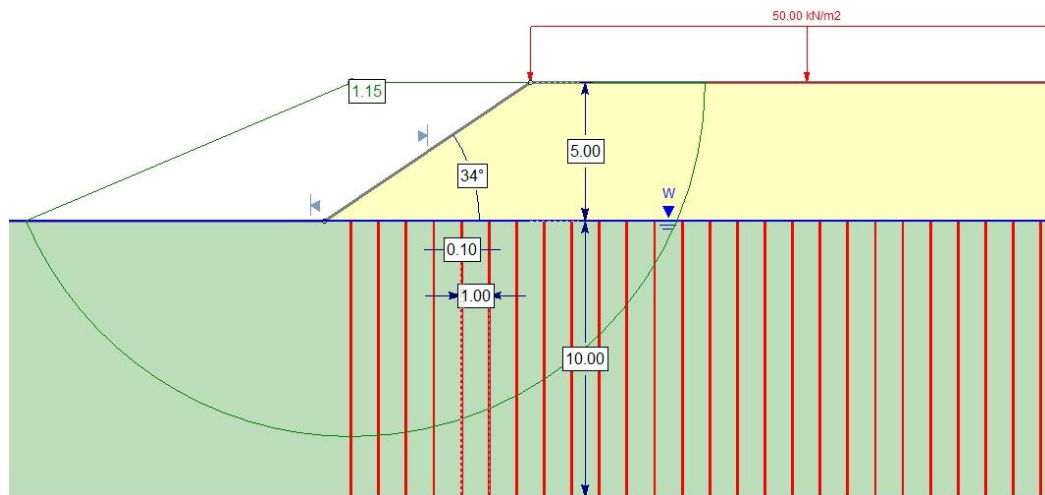
Fonte: Produção do próprio autor

5.4.1.2.3 Representação das colunas pelo modelo da coesão equivalente proposto por Raithel

A coesão equivalente proposta por Raithel pode ser obtida diretamente do *software* RingtracS mostrada na Figura 5.55, onde pode ser visto que tem magnitude igual a 304,22 kN/m².

Figura 5.58 - Análise da estabilidade global do Estudo A do Caso Taxa Cobertura pelo método de Raithel considerando coesão equivalente.

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Cohesion Type	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Aterro		19	Mohr-Coulomb	20	30		Water Surface	Custom	1	
Solo Mole		16	Undrained	15		Constant	None			0
Coluna Granular com Coesão Equivalente		20	Mohr-Coulomb	304.22	34		Water Surface	Custom	1	



Fonte: Produção do próprio autor

5.4.1.2.4 Representação das colunas pelo modelo do ângulo de atrito interno efetivo equivalente proposto por Raithel

Primeiramente, calcula-se o coeficiente de empuxo ativo:

$$K_{a,c} = \frac{1 - \sin \phi'_c}{1 + \sin \phi'_c} = \frac{1 - \sin 34^\circ}{1 + \sin 34^\circ}$$

$$K_{a,c} = 0,28$$

Considerando um ponto no meio da camada de argila e adotando o valor do acréscimo de tensão vertical sobre a coluna obtido com o resultado do *software* RingtracS, calcula-se o acréscimo da tensão horizontal atuante nas colunas:

$$\Delta\sigma_{h,c} = \Delta\sigma_{v,c} \cdot K_{a,c} + \sigma_{v,0,c} \cdot K_{a,c} = 1226,13 \cdot 0,28 + \left(\frac{1}{2} \cdot 20 \cdot 10\right) \cdot 0,28$$

$$\Delta\sigma_{h,c} = 371,32 \text{ kN/m}$$

Sendo o raio do geossintético e sua deformação máxima dados, respectivamente, por:

$$r_{\text{geo}} = \Delta r_{\text{geo}} + r_{\text{geo},0}$$

$$\varepsilon_{\text{geo,max}} = \frac{\Delta r_{\text{geo}}}{r_{\text{geo}}}$$

tem-se o valor do raio do geossintético a partir do valor da deformação máxima do geossintético obtido com o resultado do *software* RingtracS :

$$r_{\text{geo}} = \frac{r_{\text{geo},0}}{1 - \varepsilon_{\text{geo,max}}} = \frac{0,40}{1 - 0,0275}$$

$$r_{\text{geo}} = 0,4113 \text{ m}$$

A partir do valor do raio do geossintético e da força mobilizada nele obtida pelo *software* RingtracS, calcula-se a tensão horizontal no geossintético:

$$\Delta\sigma_{h,\text{geo}} = \frac{T_{\text{geo}}}{r_{\text{geo}}} = \frac{129,41}{0,4113}$$

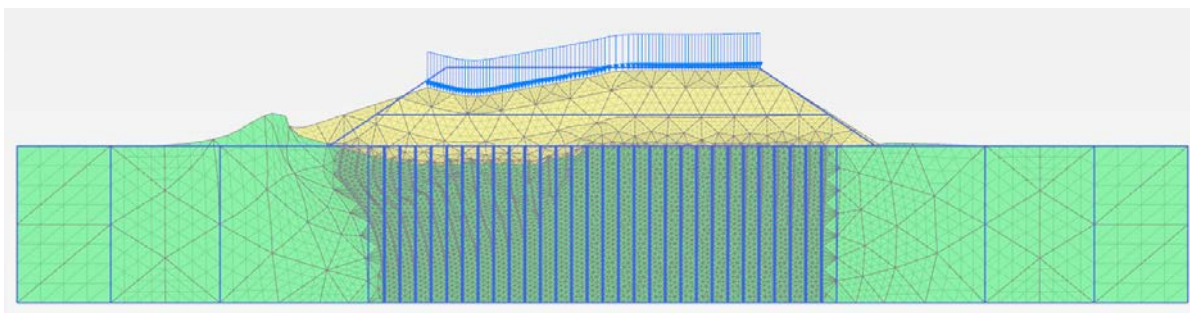
$$\Delta\sigma_{h,\text{geo}} = 314,64 \text{ kN/m}$$

Finalmente, torna-se possível calcular o ângulo de atrito interno efetivo equivalente:

$$\text{sen } \varphi'_{c,\text{eq}} = \frac{\frac{1 + \text{sen } \varphi'_c + \frac{\Delta\sigma_{h,\text{geo}}}{\Delta\sigma_{h,c}} - 1}{1 - \text{sen } \varphi'_c - \frac{\Delta\sigma_{h,\text{geo}}}{\Delta\sigma_{h,c}} + 1}}{\frac{1 + \text{sen } 34^\circ + \frac{314,64}{371,32} - 1}{1 - \text{sen } 34^\circ - \frac{314,64}{371,32} + 1}} = \frac{1 + \text{sen } 34^\circ + \frac{314,64}{371,32} - 1}{1 - \text{sen } 34^\circ - \frac{314,64}{371,32} + 1}$$

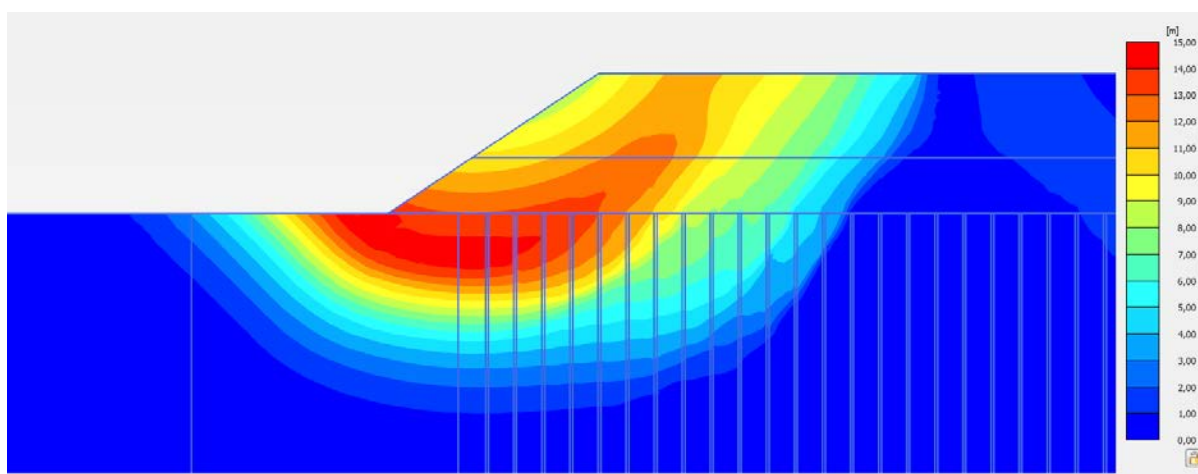
$$\varphi'_{c,\text{eq}} = 66,5^\circ$$

Figura 5.59 – Malha de elementos finitos e demonstração do deslocamento do maciço de solo após ruptura para o Estudo A do Caso Taxa Cobertura.



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 5.60 – Deslocamentos totais proveniente da análise de estabilidade global do Estudo A do Caso Taxa Cobertura pelo método dos elementos finitos.



Fonte: Produção do próprio autor

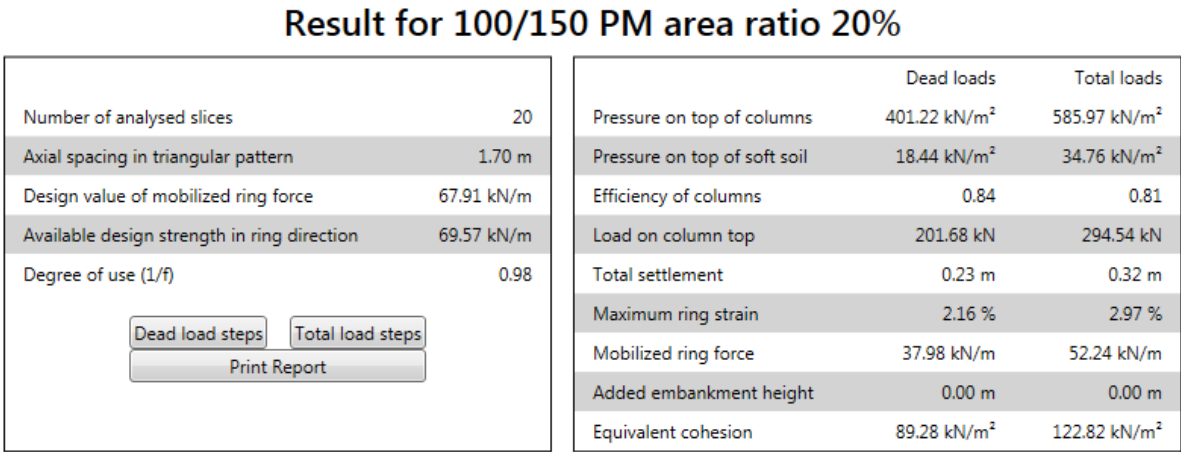
A análise por elementos finitos para o Estudo A do Caso Taxa Cobertura apresentou $FS = 1,36$.

5.4.2 Estudo B

5.4.2.1 Dimensionamento do geotêxtil

Fazendo-se uso do *software* RingtracS, primeiramente, foi possível determinar a resistência disponível do geotêxtil mínima necessária, ou seja, quando esta atingia valor maior ou igual à força mobilizada no encamisamento. Dentre outros resultados, o *software* gera em sua saída a magnitude das tensões atuantes no topo das colunas ($\sigma_{v,c}$) e no topo do solo mole ($\sigma_{v,s}$), como pode ser visto na figura a seguir.

Figura 5.61 - Resultados do dimensionamento do geotêxtil para o Estudo B do Caso Taxa Cobertura no *software* RingtracS.



Fonte: Produção do próprio autor

A partir da figura, para o Estudo B do Caso Taxa Cobertura, observa-se que:

- A resistência disponível na direção perimetral do geotêxtil vale 69,57 kN/m sendo superior à força mobilizada no encamisamento que apresenta resultado igual a 67,91 kN/m, portanto este geotêxtil resiste às solicitações, sendo o de menor resistência possível para o caso (maior economia);
- O geotêxtil Ringtrac 100/150 PM adotado apresenta módulo de rigidez nominal igual a 2000 kN/m, resistência à tração nominal igual a 100 kN/m na direção longitudinal e igual a 150 kN/m na direção perimetral e deformação na resistência nominal de 6% no sentido transversal;

- As tensões atuantes no topo das colunas ($\sigma_{v,c}$) foram de 585,97 kN/m², enquanto que as atuantes no topo do solo mole ($\sigma_{v,s}$) apresentam valor igual a 34,76 kN/m², resultando em uma eficiência das colunas de 81%;
- O dimensionamento indicou deformação máxima no reforço ($\epsilon_{geo,max}$) de 2,97%;
- A tração mobilizada no reforço geossintético (T_{geo}) foi de 52,24 kN/m, resultando em uma coesão equivalente pelo método de Raithel (c_{eq}) igual a 122,82 kN/m².

5.4.2.2 Análises de estabilidade global

5.4.2.2.1 Representação das colunas pelo método de Priebe considerando área equivalente

Pelo ábaco da Figura 3.7, o fator de melhoria (n) tem valor igual a 1,9 para os parâmetros adotados. Dessa forma, torna-se possível calcular o fator reduzido de concentração de tensões na coluna (recomendado).

$$m^* = \frac{n - 1}{n} = \frac{1,9 - 1}{1,9}$$

$$m^* = 0,47$$

Com esse fator, obtêm-se os parâmetros do solo equivalente:

$$\tan \varphi'_m = m^* \cdot \tan \varphi'_c + (1 - m^*) \cdot \tan \varphi'_s = 0,47 \cdot \tan 34^\circ + (1 - 0,47) \cdot \tan 24^\circ$$

$$\varphi'_m = 28,9^\circ$$

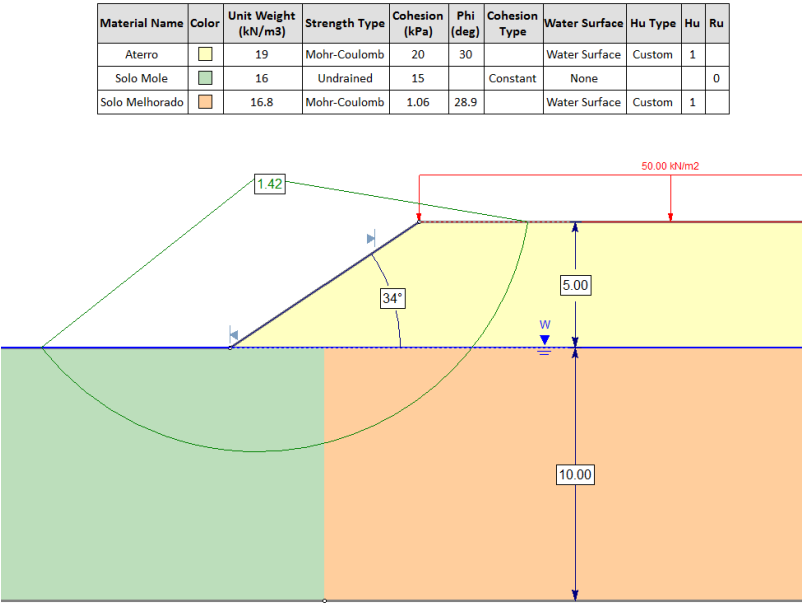
$$c'_m = (1 - m^*) \cdot c'_s = (1 - 0,47) \cdot 2$$

$$c'_m = 1,06 \text{ kPa}$$

$$\gamma_m = \gamma_c \cdot a_E + \gamma_s \cdot (1 - a_E) = 20 \cdot 0,20 + 16 \cdot (1 - 0,20)$$

$$\gamma_m = 16,8 \text{ kN/m}^3$$

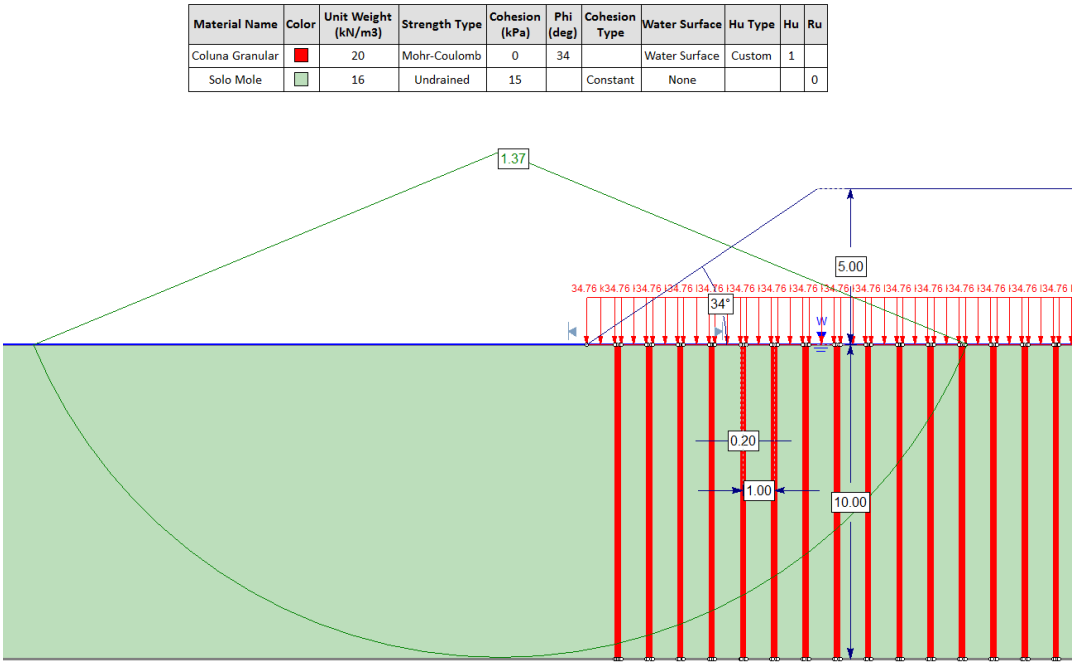
Figura 5.62 - Análise da estabilidade global do Estudo B do Caso Taxa Cobertura pelo método de Priebe considerando área equivalente.



Fonte: Produção do próprio autor

5.4.2.2.2 Representação das colunas pelo método adaptado de Priebe considerando modelo das cargas concentradas

Figura 5.63 - Análise da estabilidade global do Estudo B do Caso Taxa Cobertura pelo método adaptado de Priebe considerando cargas concentradas.



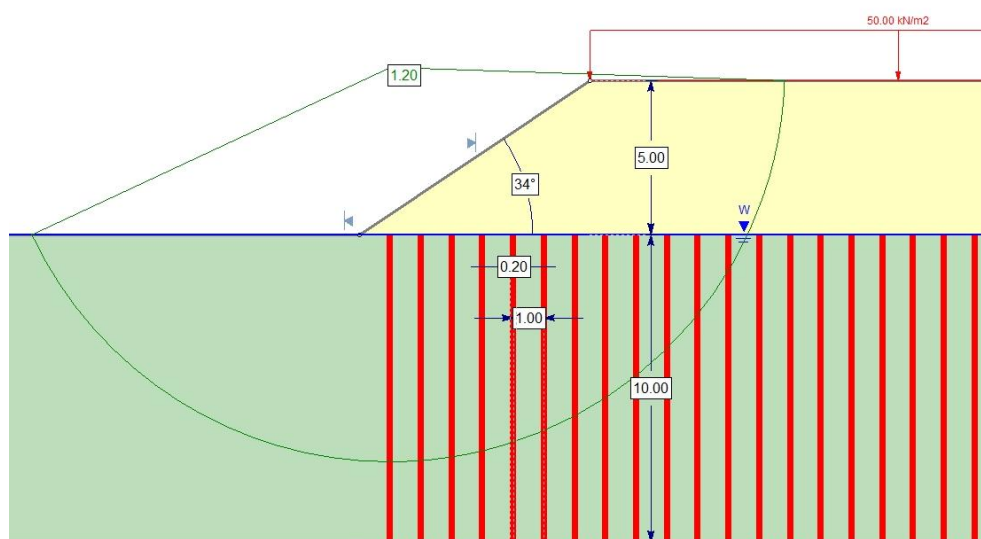
Fonte: Produção do próprio autor

5.4.2.2.3 Representação das colunas pelo modelo da coesão equivalente proposto por Raithel

A coesão equivalente proposta por Raithel pode ser obtida diretamente do *software* RingtracS mostrada na Figura 5.61, onde pode ser visto que tem magnitude igual a 122,82 kN/m².

Figura 5.64 - Análise da estabilidade global do Estudo B do Caso Taxa Cobertura pelo método de Raithel considerando coesão equivalente.

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Cohesion Type	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Aterro		19	Mohr-Coulomb	20	30		Water Surface	Custom	1	
Solo Mole		16	Undrained	15		Constant	None			0
Coluna Granular com Coesão Equivalente		20	Mohr-Coulomb	122.82	34		Water Surface	Custom	1	



Fonte: Produção do próprio autor

5.4.2.2.4 Representação das colunas pelo modelo do ângulo de atrito interno efetivo equivalente proposto por Raithel

Primeiramente, calcula-se o coeficiente de empuxo ativo:

$$K_{a,c} = \frac{1 - \sin \phi'_c}{1 + \sin \phi'_c} = \frac{1 - \sin 34^\circ}{1 + \sin 34^\circ}$$

$$K_{a,c} = 0,28$$

Considerando um ponto no meio da camada de argila e adotando o valor do acréscimo de tensão vertical sobre a coluna obtido com o resultado do *software* RingtracS, calcula-se o acréscimo da tensão horizontal atuante nas colunas:

$$\Delta\sigma_{h,c} = \Delta\sigma_{v,c} \cdot K_{a,c} + \sigma_{v,0,c} \cdot K_{a,c} = 585,97 \cdot 0,28 + \left(\frac{1}{2} \cdot 20 \cdot 10\right) \cdot 0,28$$

$$\Delta\sigma_{h,c} = 192,07 \text{ kN/m}$$

Sendo o raio do geossintético e sua deformação máxima dados, respectivamente, por:

$$r_{\text{geo}} = \Delta r_{\text{geo}} + r_{\text{geo},0}$$

$$\varepsilon_{\text{geo,max}} = \frac{\Delta r_{\text{geo}}}{r_{\text{geo}}}$$

tem-se o valor do raio do geossintético a partir do valor da deformação máxima do geossintético obtido com o resultado do *software* RingtracS :

$$r_{\text{geo}} = \frac{r_{\text{geo},0}}{1 - \varepsilon_{\text{geo,max}}} = \frac{0,40}{1 - 0,0297}$$

$$r_{\text{geo}} = 0,4122 \text{ m}$$

A partir do valor do raio do geossintético e da força mobilizada nele obtida pelo *software* RingtracS, calcula-se a tensão horizontal no geossintético:

$$\Delta\sigma_{h,\text{geo}} = \frac{T_{\text{geo}}}{r_{\text{geo}}} = \frac{52,24}{0,4122}$$

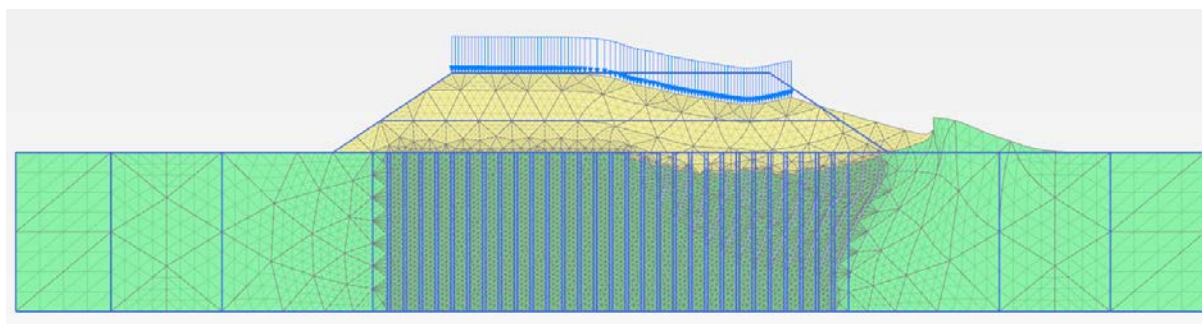
$$\Delta\sigma_{h,\text{geo}} = 126,73 \text{ kN/m}$$

Finalmente, torna-se possível calcular o ângulo de atrito interno efetivo equivalente:

$$\text{sen } \varphi'_{c,\text{eq}} = \frac{\frac{1 + \text{sen } \varphi'_c + \frac{\Delta\sigma_{h,\text{geo}}}{\Delta\sigma_{h,c}} - 1}{1 + \text{sen } \varphi'_c - \frac{\Delta\sigma_{h,\text{geo}}}{\Delta\sigma_{h,c}} + 1}}{\frac{1 + \text{sen } 34^\circ + \frac{126,73}{192,07} - 1}{1 + \text{sen } 34^\circ - \frac{126,73}{192,07} + 1}} = \frac{1 + \text{sen } 34^\circ + \frac{126,73}{192,07} - 1}{1 + \text{sen } 34^\circ - \frac{126,73}{192,07} + 1}$$

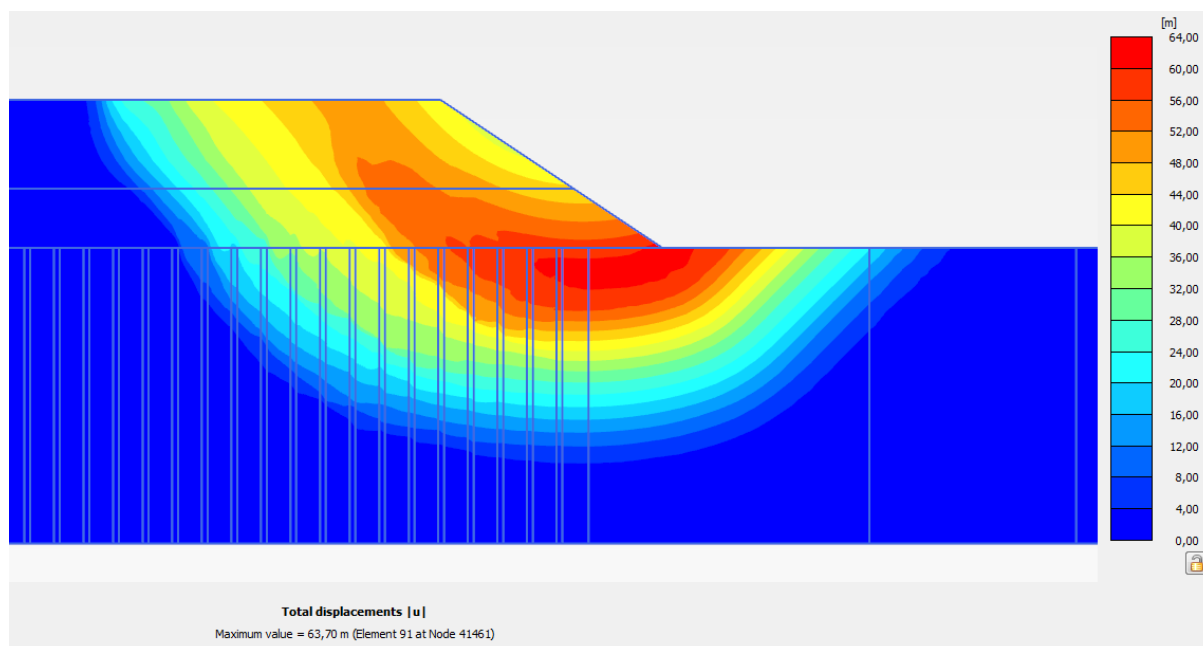
$$\varphi'_{c,\text{eq}} = 55,5^\circ$$

Figura 5.65 – Malha de elementos finitos e demonstração do deslocamento do maciço de solo após ruptura para o Estudo B do Caso Taxa Cobertura.



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 5.66 – Deslocamentos totais proveniente da análise de estabilidade global do Estudo B do Caso Taxa Cobertura pelo método dos elementos finitos.



Fonte: Produção do próprio autor

A análise por elementos finitos para o Estudo B do Caso Taxa Cobertura apresentou FS = 1,42.

5.4.3 Estudo C

5.4.3.1 Dimensionamento do geotêxtil

Fazendo-se uso do *software* RingtracS, adotou-se a magnitude do módulo de rigidez do geotêxtil igual ao valor obtido com o dimensionamento para o Estudo A do Caso Taxa Cobertura: 6500 kN/m (Ringtrac 100/400 MP); enquanto que o valor da taxa de cobertura foi o mesmo adotado no Estudo B. Dentre outros resultados, o *software* gera em sua saída a magnitude das tensões atuantes no topo das colunas ($\sigma_{v,c}$) e no topo do solo mole ($\sigma_{v,s}$), como pode ser visto na figura a seguir.

Figura 5.67 - Resultados do dimensionamento do geotêxtil para o Estudo C do Caso Taxa Cobertura no *software* RingtracS.

Result for 100/400 PM area ratio 20%

Number of analysed slices	20
Axial spacing in triangular pattern	1.70 m
Design value of mobilized ring force	94.22 kN/m
Available design strength in ring direction	185.53 kN/m
Degree of use (1/f)	0.51

Dead load steps

Total load steps

Print Report

	Dead loads	Total loads
Pressure on top of columns	451.84 kN/m ²	683.01 kN/m ²
Pressure on top of soft soil	5.79 kN/m ²	10.50 kN/m ²
Efficiency of columns	0.95	0.94
Load on column top	227.12 kN	343.32 kN
Total settlement	0.14 m	0.21 m
Maximum ring strain	1.03 %	1.54 %
Mobilized ring force	48.22 kN/m	72.48 kN/m
Added embankment height	0.00 m	0.00 m
Equivalent cohesion	113.37 kN/m ²	170.39 kN/m ²

Fonte: Produção do próprio autor

A partir da figura, para o Estudo C do Caso Taxa Cobertura, observa-se que:

- A resistência disponível na direção perimetral do geotêxtil vale 185,53 kN/m sendo superior à força mobilizada no encamisamento que apresenta resultado igual a 94,22 kN/m, portanto este geotêxtil resiste às solicitações;
- O geotêxtil Ringtrac 100/400 PM adotado apresenta módulo de rigidez nominal igual a 6500 kN/m e resistência à tração nominal igual a 100 kN/m na direção longitudinal e igual a 400 kN/m na direção perimetral e deformação na resistência nominal de 6% no sentido transversal;

- As tensões atuantes no topo das colunas ($\sigma_{v,c}$) foram de 683,01 kN/m², enquanto que as atuantes no topo do solo mole ($\sigma_{v,s}$) apresentam valor igual a 10,50 kN/m², resultando em uma eficiência das colunas de 94%;
- O dimensionamento indicou deformação máxima no reforço ($\epsilon_{geo,max}$) de 1,54%;
- A tração mobilizada no reforço geossintético (T_{geo}) foi de 72,48 kN/m, resultando em uma coesão equivalente pelo método de Raithel (c_{eq}) igual a 170,39 kN/m².

5.4.3.2 Análises de estabilidade global

5.4.3.2.1 Representação das colunas pelo método de Priebe considerando área equivalente

Pelo ábaco da Figura 3.7, o fator de melhoria (n) tem valor igual a 1,65 para os parâmetros adotados. Dessa forma, torna-se possível calcular o fator reduzido de concentração de tensões na coluna (recomendado).

$$m^* = \frac{n - 1}{n} = \frac{1,65 - 1}{1,65}$$

$$m^* = 0,39$$

Com esse fator, obtêm-se os parâmetros do solo equivalente:

$$\tan \varphi'_m = m^* \cdot \tan \varphi'_c + (1 - m^*) \cdot \tan \varphi'_s = 0,39 \cdot \tan 34^\circ + (1 - 0,39) \cdot \tan 30^\circ$$

$$\varphi'_m = 31,6^\circ$$

$$c'_m{}^* = (1 - m^*) \cdot c'_s = (1 - 0,39) \cdot 3,5$$

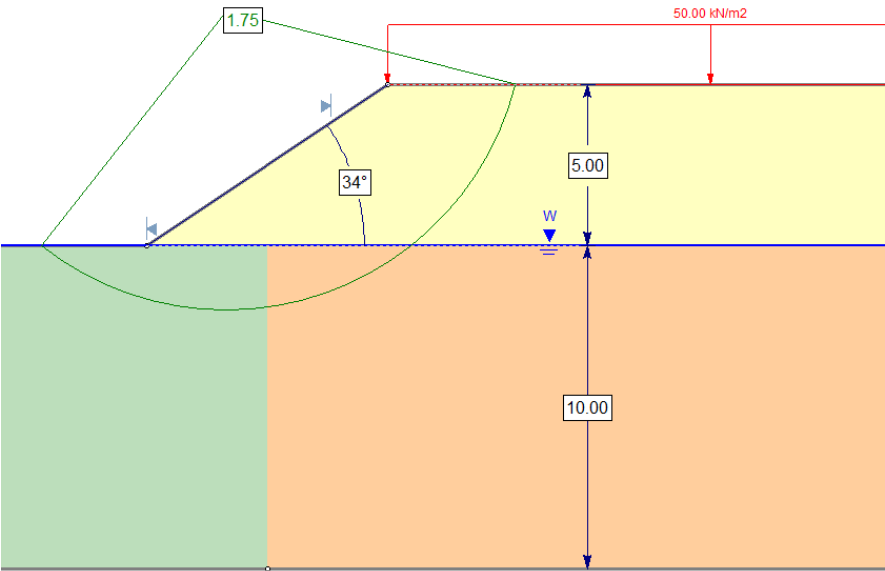
$$c'_m{}^* = 2,13 \text{ kPa}$$

$$\gamma_m = \gamma_c \cdot a_E + \gamma_s \cdot (1 - a_E) = 20 \cdot 0,15 + 16 \cdot (1 - 0,15)$$

$$\gamma_m = 16,6 \text{ kN/m}^3$$

Figura 5.68 - Análise da estabilidade global do Estudo C do Caso Taxa Cobertura pelo método de Priebe considerando área equivalente.

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m3)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Cohesion Type	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Aterro		19	Mohr-Coulomb	20	30		Water Surface	Custom	1	
Solo Mole		16	Undrained	25		Constant	None			0
Solo Melhorado		16.6	Mohr-Coulomb	2.13	31.6		Water Surface	Custom	1	

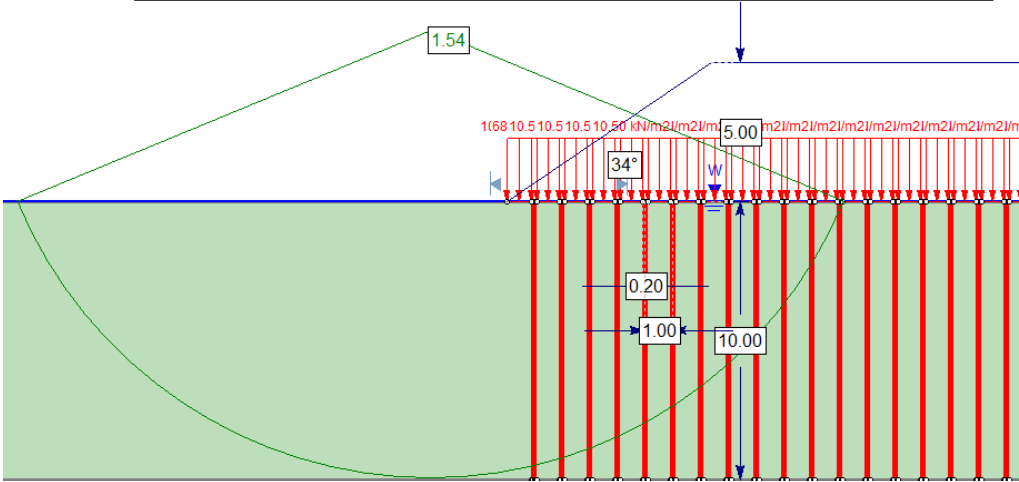


Fonte: Produção do próprio autor

5.4.3.2.2 Representação das colunas pelo método adaptado de Priebe considerando modelo das cargas concentradas

Figura 5.69 - Análise da estabilidade global do Estudo C do Caso Taxa Cobertura pelo método adaptado de Priebe considerando cargas concentradas.

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m3)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Cohesion Type	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Coluna Granular		20	Mohr-Coulomb	0	34		Water Surface	Custom	1	
Solo Mole		16	Undrained	15		Constant	None			0

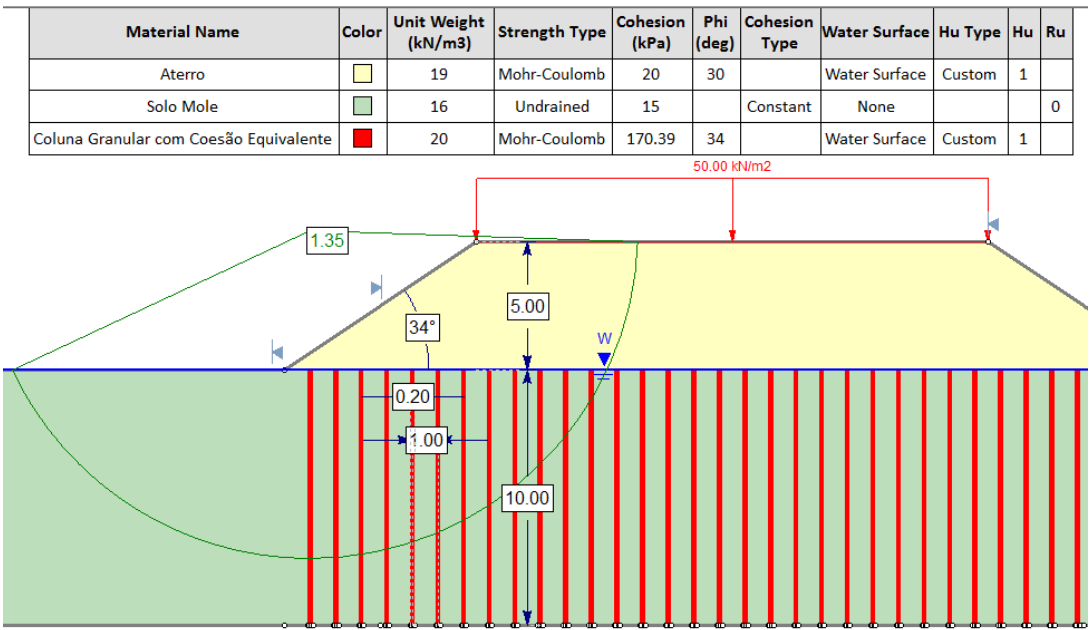


Fonte: Produção do próprio autor

5.4.3.2.3 Representação das colunas pelo modelo da coesão equivalente proposto por Raithel

A coesão equivalente proposta por Raithel pode ser obtida diretamente do *software* RingtracS mostrada na Figura 5.67 onde pode ser visto que tem magnitude igual a 170,39 kN/m².

Figura 5.70 - Análise da estabilidade global do Estudo C do Caso Taxa Cobertura pelo método de Raithel considerando coesão equivalente.



Fonte: Produção do próprio autor

6 DISCUSSÃO

Os Fatores de Segurança (FS) obtidos através das análises realizadas apresentam-se compilados em forma de tabelas para melhor comparação.

Tabela 6.1 - Resultados das análises para o Caso Modelo.

Metodologia		FS
Análise por Equilíbrio Limite	Área Equivalente por Priebe	1,40
	Carga Concentrada adaptada de Priebe	1,44
	Coesão Equivalente por Raithel	1,24
Análise Numérica	Elementos Finitos	1,43
Eficiência das Colunas		87%

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 6.2 - Resultados das análises para o Caso Solo Mole.

Metodologia		FS		
		A	B	C
Análise por Equilíbrio Limite	Área Equivalente por Priebe	0,93	1,75	1,75
	Carga Concentrada adaptada de Priebe	1,04	1,50	1,76
	Coesão Equivalente por Raithel	0,84	1,38	1,58
Análise Numérica	Elementos Finitos	0,73	1,79	-
Eficiência das Colunas		98%	62%	84%

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 6.3 - Resultados das análises para o Caso Material Preenchimento.

Metodologia		FS					
		Areia			Brita		
		A	B	C	A	B	C
Análise por Equilíbrio Limite	Área Equivalente por Priebe	1,32	1,49	1,49	1,32	1,49	1,49
	Carga Concentrada adaptada de Priebe	1,11	1,55	1,63	1,20	1,62	1,70
	Coesão Equivalente por Raithel	1,15	1,12	1,17	1,25	1,17	1,22
Análise Numérica	Elementos Finitos	1,31	1,40	-	1,38	1,44	-
Eficiência das Colunas		73%	80%	86%	82%	85%	91%

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 6.4 - Resultados das análises para o Caso Taxa Cobertura.

Metodologia		FS		
		A	B	C
Análise por Equilíbrio Limite	Área Equivalente por Priebe	1,37	1,42	1,42
	Carga Concentrada adaptada de Priebe	1,40	1,37	1,54
	Coesão Equivalente por Raithel	1,15	1,20	1,35
Análise Numérica	Elementos Finitos	1,36	1,42	-
Eficiência das Colunas		85%	81%	94%

Fonte: Produção do próprio autor

6.1 METODOLOGIAS POR EQUILÍBRIO LIMITE: AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Para os Casos Modelo, Solo Mole e Taxa Cobertura, observando somente as análises por equilíbrio limite, os resultados obtidos por Coesão Equivalente de Raithel sempre se mostraram mais críticos e, portanto, mais conservadores. Já as análises que apresentaram maior FS dependeram do valor da eficiência das colunas: para valores iguais ou superiores a 84%, a Metodologia por Carga Concentrada apresentou resultado superior à metodologia da Área Equivalente por Priebe, enquanto que para valores inferiores a 84% ocorreu o inverso. Pode-se observar que essa transição de comportamento de resultados ocorreu aproximadamente aos 84% de eficiência das colunas ao notar-se através do Estudo C do Caso Solo Mole que os resultados para os dois métodos discutidos apresentam diferença insignificante de resultados.

Como a Metodologia da Área Equivalente por Priebe independe das cargas concentradas obtidas pelo *software* RingtracS e, portanto, da eficiência das colunas, fica evidente que apenas os resultados obtidos pelo Método das Cargas Concentradas são influenciados pelos valores de eficiência das colunas.

Já para o Caso Material Preenchimento, observa-se que ao se adotar um ângulo de atrito efetivo relativamente baixo (28°) (representado pelo Estudo A), as análises por Cargas Concentradas apresentaram os FS mais críticos dentre as análises por equilíbrio limite sendo inferiores às análises por Coesão Equivalente de Raithel para ambos os preenchimentos (areia e brita). Enquanto que ao se adotar um ângulo de atrito efetivo relativamente alto (40°) as

análises por Cargas Concentradas apresentaram os FS mais altos para ambos os preenchimentos (areia e brita).

Portanto, a partir das comparações dos resultados das análises por equilíbrio limite, observa-se que dois fatores têm grande influência sobre a análise por método das Cargas Concentradas: eficiência das colunas e o ângulo de atrito interno efetivo do material de preenchimento, sendo que este último apresentou maior impacto sobre os resultados uma vez que mesmo quando a eficiência das colunas apresentou valor igual a 80% (inferior a 84%), a metodologia das Cargas Concentradas apresentou FS maior do que a metodologia da Área Equivalente pelo valor do ângulo de atrito efetivo ser alto (40°) (Caso Material Preenchimento com preenchimento de areia para o Estudo B).

6.2 METODOLOGIAS POR ELEMENTOS FINITOS: AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS COMPARADOS AOS OBTIDOS POR METODOLOGIAS POR EQUILÍBRIO LIMITE

Comparando os resultados obtidos pela metodologia de elementos finitos com os resultados obtidos por análises de equilíbrio limite, observa-se que para o Caso Solo Mole, a análise por elementos finitos apresentou-se com menor e maior FS para os Estudos A e B, respectivamente, dentre todas as metodologias. Essa comparação permite concluir que este método se mostrou mais sensível à variação dos parâmetros do Solo Mole do que à variação dos demais parâmetros, cujos Fatores de Segurança resultaram majoritariamente em valores intermediários quando comparados aos das metodologias de equilíbrio limite.

6.3 INFLUÊNCIA DO TIPO DE MATERIAL DE PREENCHIMENTO NAS ANÁLISES

Tabela 6.5 – Relação do tipo de material de preenchimento com o geotêxtil dimensionado e com os resultados de estabilidade obtidos para o Estudo A do Caso Material Preenchimento.

Material Preenchimento	Módulo de Rigidez do Geotêxtil [kN/m]	FS			
		Área Equivalente por Priebe	Carga Concentrada adaptada de Priebe	Coesão Equivalente por Raithel	Elementos Finitos
Areia	3500	1,32	1,11	1,15	1,31
Brita	4900	1,32	1,20	1,25	1,38

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 6.6 - Relação do tipo de material de preenchimento com o geotêxtil dimensionado e com os resultados de estabilidade obtidos para o Estudo B do Caso Material Preenchimento.

Material Preenchimento	Módulo de Rigidez do Geotêxtil [kN/m]	FS			
		Área Equivalente por Priebe	Carga Concentrada adaptada de Priebe	Coesão Equivalente por Raithel	Elementos Finitos
Areia	2000	1,49	1,55	1,12	1,40
Brita	3500	1,49	1,62	1,17	1,44

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 6.7 - Relação do tipo de material de preenchimento com o geotêxtil dimensionado e com os resultados de estabilidade obtidos para o Estudo C do Caso Material Preenchimento.

Material Preenchimento	Módulo de Rigidez do Geotêxtil [kN/m]	FS		
		Área Equivalente por Priebe	Carga Concentrada adaptada de Priebe	Coesão Equivalente por Raithel
Areia	3500	1,49	1,63	1,17
Brita	4900	1,49	1,70	1,22

Fonte: Produção do próprio autor

Através das Tabelas 6.5, 6.6 e 6.7 é possível notar que a metodologia de Área Equivalente de Priebe se mantém invariável, frente ao geotêxtil, uma vez que a diferença entre as análises com areia e brita são unicamente em relação ao Fator de Redução por danos

mecânicos considerado na camisa geossintética e essa metodologia não considera o encamisamento no procedimento de cálculo para obtenção dos parâmetros do solo equivalente.

Já para as demais metodologias, observa-se que as análises realizadas com brita apresentaram FSs superiores às realizadas com areia. Isso pode ser explicado pelo fato de a brita ser desfavorável para o dimensionamento do geotêxtil, por causar maior dano no tecido quando comparado com a areia. Dessa forma, o Fator de Redução por danos mecânicos adotado para o preenchimento com brita é superior ao adotado para areia. Assim, o geotêxtil dimensionado para preenchimento com brita apresenta maior rigidez e resistência à tração, resultando em maiores FS na análise da estabilidade global em relação ao preenchimento com areia como pôde ser visto nas Tabelas 6.5, 6.6 e 6.7.

6.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS PELA METODOLOGIA DA ÁREA EQUIVALENTE POR PRIEBE

Como já observado, não há a consideração do encamisamento geotêxtil no procedimento de cálculo dos parâmetros do solo melhorado pela metodologia da Área Equivalente por Priebe. Devido a isso, essa metodologia se mostra uma das mais conservadoras por realizar a análise como se fosse um sistema de colunas granulares convencionais (sem encamisamento). Contudo, nota-se pelos resultados que essa metodologia apresentou, de um modo geral, FS maiores do que as das outras metodologias. Isso pode ser justificado pelo fato de que ela considera que toda a área equivalente apresenta parâmetros efetivos, ou seja, mesmo o solo mole é representado em condição drenada. Todavia, as demais metodologias, representam o solo mole em termos de sua resistência não-drenada apenas, o que reduz o valor do FS.

6.5 COMPARAÇÃO DOS ESTUDOS A E C DE CADA CASO EM TERMOS DE FS

Será abordada uma comparação entre resultados obtidos entre A e C de cada Caso estudado a fim de se avaliar a influência da variação dos parâmetros nos FSs sem que haja influência do encamisamento geotêxtil nas análises.

É possível observar que tanto para o Caso Solo Mole quanto para o Caso Taxa Cobertura, o aumento da magnitude dos parâmetros do solo mole e da taxa de cobertura, respectivamente, implicou no aumento da estabilidade.

Já para o Caso Material Preenchimento, nota-se que a apenas para o estudo com preenchimento de brita foi obtido um resultado inverso, ou seja, que o aumento do ângulo de atrito interno efetivo não aumentou a estabilidade. Isso ocorreu para a metodologia por Coesão Equivalente de Raithel. Avaliando-se assim a fórmula da coesão equivalente expressa pela equação 3.19, nota-se que a parcela trigonométrica aumenta com o aumento do ângulo de atrito interno efetivo, contudo, para os estudos realizados, a tração mobilizada no reforço variou negativamente com o aumento do ângulo de atrito interno efetivo das colunas, de modo que a coesão equivalente também teve seu valor reduzido com o aumento desse parâmetro.

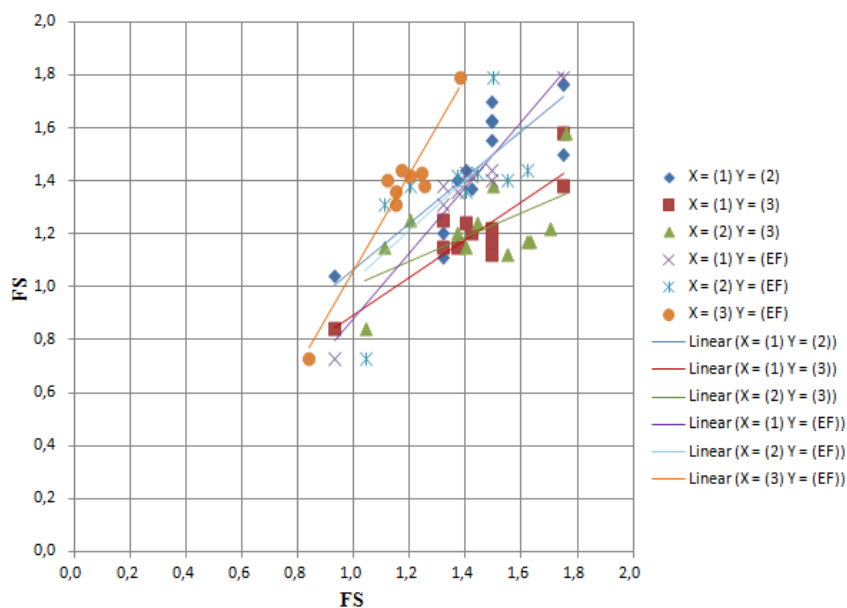
Portanto, para a metodologia por Coesão Equivalente de Raithel, deve-se realizar uma análise mais minuciosa da variação da coesão equivalente com a mudança do ângulo de atrito interno efetivo das colunas para ter-se uma ideia do comportamento do FS.

6.6 CORRELAÇÃO LINEAR ENTRE METODOLOGIAS

Na Figura 6.1 a seguir é apresentado um gráfico feito para obtenção da correlação linear entre as metodologias, cujos valores de R^2 se encontram apresentados na figura 6.2 em que:

- (1) representa a metodologia da área equivalente por Priebe;
- (2) representa a metodologia das cargas concentradas;
- (3) representa a metodologia da coesão equivalente por Raithel;
- (EF) representa a metodologia por elementos finitos.

Figura 6.1 – Gráfico da correlação linear entre as metodologias estudadas.



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 6.2 – Resultado de R^2 da correlação linear entre as metodologias estudadas.

◆ X = (1) Y = (2)	$R^2 = 0,6375$
■ X = (1) Y = (3)	$R^2 = 0,7755$
▲ X = (2) Y = (3)	$R^2 = 0,3779$
× X = (1) Y = (EF)	$R^2 = 0,9504$
✱ X = (2) Y = (EF)	$R^2 = 0,483$
● X = (3) Y = (EF)	$R^2 = 0,9223$

Fonte: Produção do próprio autor

Pelos resultados obtidos com o gráfico, pode-se dizer que apenas as correlações lineares de (1) com (EF) e de (3) com (EF) apresentaram valores de R^2 maiores do que 90%. As demais correlações entre metodologias apresentam correlação com R^2 muito baixo, provavelmente porque entre cada uma dessas análises às vezes mais de um parâmetro foi variado. Para melhor aferir esses resultados, futuras análises devem ser realizadas de modo a comparar os Fatores de Segurança sob a ótica de todos os parâmetros que foram trabalhados (características do geotêxtil, propriedades de resistências dos materiais, etc).

Dessa forma, na falta de resultados, pode-se estabelecer uma correlação entre as metodologias (1) e (3), (3) e (EF), respectivamente, pelas expressões a seguir.

$$FS(EF) = 1,2387 \cdot FS(1) + 0,3568 \quad (6.1)$$

$$FS(EF) = 1,8145 \cdot FS(3) + 0,7547 \quad (6.2)$$

7 CONCLUSÃO

Com exceção ao Caso Material Preenchimento, a metodologia da Coesão Equivalente de Raithel aplicada para as análises por equilíbrio limite, apresentou os resultados mais críticos, enquanto que as que resultaram em maior Fator de Segurança dependeram da eficiência das colunas, pois seu valor tem grande influência sobre a metodologia por Carga Concentrada (para eficiência igual ou superior à 84%, metodologia por Carga Concentrada apresentou maior FS, quando não, a metodologia por Área Equivalente apresentou-se com maior FS).

O ângulo de atrito interno efetivo do material de preenchimento se mostrou com ainda mais relevância sobre os resultados das análises que aplicam a metodologia das Cargas Concentradas do que a eficiência das colunas. Pelos valores de FS obtidos, é possível afirmar que deve-se ter receio ao realizar as análises de estabilidade global por esse método ao se adotar valores muito baixos ou muito altos de ângulo de atrito interno efetivo do material de preenchimento, pois pode-se ter uma análise bastante conservadora ou imprópria por não ser à favor da segurança, respectivamente, se comparado aos demais métodos.

A metodologia por elementos finitos com representação do encamisamento geotêxtil no modelo por um ângulo de atrito interno efetivo equivalente fictício do material de preenchimento se mostrou satisfatória uma vez que apresentou resultados de Fatores de Segurança próximos e majoritariamente intermediários quando comparados aos das metodologias de equilíbrio limite.

Foi observado também que valores extremos de alguns parâmetros podem provocar maior influência no resultado obtido por determinadas metodologias de representação das colunas. Isso foi verificado para a metodologia que considera ângulo de atrito interno efetivo equivalente fictício do material de preenchimento, no qual se realizou análise de estabilidade global por elementos finitos. Viu-se que esse método se mostrou bastante sensível às variações dos parâmetros do solo mole.

A metodologia da Área Equivalente por Priebe mostrou-se em muitos casos a com maior Fator de Segurança dentre todas as metodologias por considerar que toda a área equivalente apresenta parâmetros efetivos (condição drenada), enquanto que as demais metodologias, ao representarem o solo mole no entorno das colunas no modelo em termos de

resistência não-drenada acabam por abaixar os valores de FS. Logo, a metodologia da Área Equivalente por Priebe é baseada em uma consideração contra a segurança e que não reflete o que ocorre realmente com o solo, uma vez que solos argilosos podem levar muito tempo para dissipar toda a água do interior de seus poros e, conseqüentemente, para que ocorra todo o recalque. O que faz com que essa metodologia não apresente valores extremamente superiores às demais por essa consideração é o fato de ela não considerar o encamisamento do geotêxtil em seu procedimento de cálculo, tornando-a uma metodologia satisfatória em termos de resultado, mesmo que não seja em termos de considerações.

Embora se tenha realizado as observações citadas, não foi possível obter correlação linear satisfatória entre os resultados para todas as metodologias estudadas nesse trabalho. Pode-se dizer que apenas as correlações lineares da metodologia de Área Equivalente com Elementos Finitos e de Coesão Equivalente com Elementos Finitos apresentaram valores altos de correlação (R^2 maiores do que 90%).

Para se obter uma correlação linear entre as demais metodologias seria necessário a realização de mais análises para avaliar de um modo mais completo como os parâmetros influenciam cada metodologia de representação das colunas, sendo avaliada a variação de cada parâmetro individualmente. Outra proposta de complemento interessante a este trabalho seria a realização de análises estatísticas dos resultados de modo a avaliar parâmetros como média, desvio padrão, variância, entre outros.

Por fim, caso os estudos realizados fossem aplicados a casos reais (não hipotéticos), poderia ter sido avaliado o uso de geogrelhas a fim de aumentar a estabilidade, uma vez que diversas análises apresentaram valores muito baixos de Fatores de Segurança (principalmente no Estudo A do Caso Solo Mole em que para algumas metodologias resultaram em FS até inferiores a 1,0), sendo que os projetistas geralmente adotam valores mínimos iguais a 1,3 ou 1,5.

REFERÊNCIAS

- ALEXIEW, D., MONTEZ, F., BROKEMPER, D. Simplified Estimation and Graphs for Pre-Design of Geosynthetic-Encased Sand or Gravel Columns as Embankment Foundation. In: Simpósio Brasileiro de Geossintéticos, 4, 2003, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre, 2003
- ALMEIDA, M. S. S., MARQUES, M. E. S. **Aterros sobre solos moles: projeto e desempenho**. Oficina de Textos. São Paulo, 2010.
- ARAÚJO, T. O., SCHMIDT, C. F., BRUGGER, P. J. **Comparação de diferentes metodologias de análise de estabilidade global de um aterro sobre solo melhorado com colunas granulares encamisadas com geossintético**. In: COBRAMSEG, 2016, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12824: Geotêxteis – Determinação da resistência à tração não-confinada – Ensaio de tração de faixa larga**. Rio de Janeiro, 1993.
- ASSOCIAÇÃO INTERNACIONAL DE GEOSSINTÉTICOS, IGS Brasil. **Os geossintéticos**. Disponível em: <<http://igsbrasil.org.br/os-geossinteticos>>. Acesso em: 04 out. 2016.
- BABAEI, I. H. P. **Test embankment on geotextile encased granular columns stabilized soft ground**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.
- BRINKGREVE, R. B. J. **Finite Element Code for Soil and Rock Analysis: PLAXIS 2D User's Manual**. Rotterdam, Netherlands, Balkema, 2002.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 8006-1: Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills**. Londres, 2010.
- CASTRO J., SAGASETA, C. Field instrumentation of an embankment on stone columns. In: International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 17, 2009, Alexandria. **Proceedings...** Alexandria, 2009.
- CHOOBBASTI, A. J., ZAHMATKESH, A., NOORZAD, R. **Performance of Stone Columns in Soft Clay: Numerical Evaluation**. Geotechnical and Geological Engineering, Vol.29, 2011.
- DUNCAN, J. M., WRIGHT, S. G., BRANDON, T. L. **Soil strength and slope stability**. John Wiley & Sons Inc. EUA, 2005.
- EBGEO. **Recommendations for design and analysis of earth structures using geosynthetic reinforcements**. German Geotechnical Society (DGGT). Berlim, 2010.
- FREITAS, M. A. C. **Análise de Estabilidade de Taludes pelos Métodos de Morgenstern-Price e Correia**. 2010. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil), Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, 2010.
- FWA. **Design and construction of stone columns**. Vol 1. Report FWA/RD-83/027. Barksdale, R.D. e Bachus R.C. Federal Administration, 1983.

GALHARDO, M. C. **Análises paramétricas de colunas granulares encamisadas com tecido geossintético através do software Ringtrac**. 2011. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Civil), Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

GHIONNA, V., JAMIOLKOWSKI, M. **Colonne di ghiaia**. X Ciclo di conferenze dedicate ai problemi di meccanica dei terreni e ingegneria delle fondazioni metodi di miglioramento dei terreni. Politecnico di Torino Ingegneria, atti dell'istituto di scienza delle costruzioni. Torino, 1981.

HEWLETT, W. J., RANDOLPH, M. F. **Analysis of piled embankments**. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts. Elsevier Science, 1988.

HUESKER. **Geogrelha altamente resistente, flexível, com um histórico comprovado em reforço de solos**. Disponível em: <<http://www.huesker.com.br/produtos/geossinteticos/geogrelhas/fortrac.html>>. Acesso em: 22 out. 2016.

LOPES, M. P., LOPES, M. L. **Durabilidade dos Geossintéticos**. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2010.

MASSAD, F. **Obras de terra: curso básico de geotecnia**. Oficina de Textos. São Paulo, 2003.

NIKOLAOU, T. N. **Estudos paramétricos em colunas granulares encamisadas com geossintético**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

PRIEBE, H. J. **The Design of Vibro Replacement**. Ground Engineering, p 31-37, 1995.

RAITHEL, M., KEMPFERT, H. G. **Calculation Models for dam foundations with geotextile coated sand columns**. Proceeding of Geoengineering. Melbourne, 2000.

RAITHEL, M. **Zum Trag – und Verformungsverhalten Von geokunststoffummantelten Sandsäulen**. Universität Gesamthochschule Kassel. Kassel, 1999.

RANKINE, W. M. J. **On Stability on Loose Earth**, Philosophic Transactions of Royal Society. Londres, 1857.

SANTOS, M. D. **Contribuição ao estudo da influência de escavações nos recalques superficiais de construções vizinhas**. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1998.

SCHAD, H. **Nichtlineare Stoffgleichungen für Böden und ihre Verwendung bei der numerischen Analyse von Grundbauaufgaben**. Baugrundinstitut, Universität Stuttgart, Mitteilung. Estugarda, 1979.

SILVA, A. E., SCHMIDT, C. F., ANDRADE, G. G. **Colunas Ringtrac para melhoramento de solo: Uso crescente no Brasil**. In: Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, 6, 2008, São Paulo.

SOUZA, G. L. A., PACHECO, M., SOUZA, R. N., VIANA, E. A. **Considerações sobre projeto e controle de execução de reforço de solos moles utilizando colunas de material granular**. 2016.

TERZAGHI, K. **Theoretical soil mechanics**. John Wiley and Sons. New York, 1943.

VERTEMATTI, J. C. **Manual Brasileiro de Geossintéticos**. 2. ed., Bluncher. São Paulo, 2015.