



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS**

**LARISSA VITÓRIA DE OLIVEIRA MARTINS**

**NICOLLE CORDEIRO CAMPOS**

**ESTABILIZAÇÃO DE ENCOSTA COM A UTILIZAÇÃO DE  
SOLO GRAMPEADO**

**LAVRAS – MG**

**2022**

**LARISSA VITÓRIA DE OLIVEIRA MARTINS**  
**NICOLLE CORDEIRO CAMPOS**

**ESTABILIZAÇÃO DE ENCOSTA COM A UTILIZAÇÃO DE SOLO GRAMPEADO**

Monografia apresentada à  
Universidade Federal de Lavras,  
como parte das exigências do Curso  
de Engenharia Civil, para a obtenção  
do título de Bacharel.



Prof. Dr. Eduardo Souza Cândido

Orientador

**LAVRAS – MG**

**2022**

**LARISSA VITÓRIA DE OLIVEIRA MARTINS**  
**NICOLLE CORDEIRO CAMPOS**

**ESTABILIZAÇÃO DE ENCOSTA COM A UTILIZAÇÃO DE SOLO GRAMPEADO**  
**SLOPE STABILIZATION WITH THE USE OF SOIL NAILING**

Monografia apresentada à  
Universidade Federal de Lavras,  
como parte das exigências do Curso  
de Engenharia Civil, para a obtenção  
do título de Bacharel.

APROVADA em 31 de outubro de 2022.

Dr. Eduardo Souza Cândido – UFLA

D. Sc. Raquel Mariano Linhares – UFLA

Dra. Natalia Assunção Brasil Silva – UFSJ

Prof. Dr. Eduardo Souza Cândido

Orientador

**LAVRAS – MG**

**2022**

## **DEDICATÓRIA**

Aos nossos pais, os maiores incentivadores das realizações dos nossos sonhos, por nunca terem medido esforços para nos proporcionarem a oportunidade de estar onde estamos, por serem apoio, incentivo e exemplo.

“Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes”

(Isaac Newton)

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, às nossas famílias, pelo incentivo nos momentos difíceis e apoio às nossas escolhas, independentemente de quais, pelo carinho e paciência durante nossa jornada acadêmica, sem vocês nada disso seria possível.

A Deus, pela vida e por nos permitir ultrapassar todos os obstáculos encontrados ao longo da realização desse trabalho.

A Universidade Federal de Lavras, que nos proporcionou a oportunidade de cursar um ensino superior e a expansão de nossos horizontes profissionais.

Ao professor e orientador Eduardo Souza Cândido, pelas correções e ensinamentos que nos permitiram apresentar um melhor desempenho durante o desenvolvimento dessa monografia e por ter desempenhado tal função com dedicação e amizade.

Aos nossos professores e mestres, por todos os ensinamentos ao longo desses anos, que foram além da teoria e nos ensinaram sobre ética, responsabilidade e dedicação, vocês foram fundamentais e tiveram impacto em nossas formações acadêmicas.

Aos nossos amigos, dentro e fora do curso de engenharia, por compartilharem conosco tantos momentos de descobertas e deixarem esses momentos mais leves, estando ao nosso lado nos momentos bons e ruins.

A todos aqueles que contribuíram, de alguma forma, para a realização desse trabalho.

## RESUMO

Ao se executar uma obra de engenharia, é necessária a movimentação do terreno natural existente na área, o que pode ocasionar a desestabilização do maciço de solo. Tal fato torna indispensável as soluções em obras de contenção, para que haja estabilização da área e evite deslizamentos e desmoronamentos que possam colocar em risco as pessoas e construções ao seu redor. São diversas as formas em que a contenção de um talude pode ser realizada, dentre elas o solo grampeado. A partir de um estudo de caso, esse trabalho tem a finalidade de analisar a estabilidade de uma encosta e verificar se há necessidade da utilização de técnicas de estabilização. E para isso, foram definidas três seções distintas da encosta estudada e, com a utilização do software Geostudio (Slope/W), realizou-se a análise da estabilidade da encosta com quatro métodos diferentes: Bishop, Fellenius, Spencer e Mongstern-Price. Com os fatores de segurança das seções definidos por meio da superfície crítica foi constatada a instabilidade do talude e elaborada uma solução através da introdução de grampos no maciço, para obter um aumento de resistência que tornasse o talude do estudo em questão estável. Os resultados encontrados foram comparados e analisados com base na literatura consultada, e para a área de estudo, a solução mais viável para a estabilização da encosta foi a utilização de seis grampos com comprimento de 3,6 metros, pois as seções apresentaram valores de segurança superiores a fator de segurança mínimo adotado. Por fim, conclui-se que o solo grampeado é uma solução coerente para a encosta estudada, visto que todas as superfícies com potencial de ruptura atingiram a estabilidade.

**Palavras-chave:** Solo grampeado. Estabilização de taludes. Contenções. Slope/W

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>REFERÊNCIAL TEÓRICO</b>	<b>2</b>
<b>2.1</b>	<b>Aspectos gerais da estabilização de talude</b>	<b>2</b>
<b>2.2</b>	<b>Método de cálculo de análise de estabilização de taludes</b>	<b>4</b>
<b>2.3</b>	<b>Solo Grampeado</b>	<b>7</b>
<b>2.4</b>	<b>Interação Solo-Grampo</b>	<b>15</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>19</b>
<b>3.1</b>	<b>Área de estudo</b>	<b>19</b>
<b>3.2</b>	<b>Coleta de dados para análise</b>	<b>20</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>26</b>
<b>4.1</b>	<b>Verificação da estabilidade das seções</b>	<b>26</b>
<b>4.2</b>	<b>Inserção dos grampos no solo</b>	<b>32</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>39</b>
<b>5.1</b>	<b>Conclusões</b>	<b>39</b>
<b>5.2</b>	<b>Sugestões para trabalhos futuros</b>	<b>40</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>48</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A urbanização e o crescimento desenfreado dos centros urbanos muitas vezes carregam como consequência da movimentação de terra a instabilidade de maciços de solos em áreas adjacentes à obra. Essa desestabilização do talude coloca em risco a vida das pessoas e edificações em seu entorno. Como a área geralmente é densamente ocupada, ou seja, nem sempre há espaço para estruturas de contenção mais robustas, é interessante explorar intervenções mais simples e que causem menos impacto nas edificações ao seu redor. Dessa forma, torna-se relevante que se estude a aplicabilidade do solo grampeado, visando refinar suas aplicações e melhorar a sua tecnologia.

Segundo Barros (2013), a análise de uma estrutura de contenção consiste na verificação do equilíbrio do conjunto formado pelo maciço de solo e a própria estrutura. Este equilíbrio é afetado pelas características de resistência, deformabilidade, permeabilidade e pelo peso próprio desses dois elementos, além das condições que regem a interação entre eles. Estas condições tornam o sistema bastante complexo e há, portanto, a necessidade de se adotarem modelos teóricos simplificados que tornem a análise possível. Estes modelos devem levar em conta as características dos materiais que influenciam o comportamento global, além da geometria e das condições locais.

Dentro desse contexto, o solo grampeado se destaca como sendo uma técnica de contenção de maciços que tem sido bastante utilizada no Brasil e no mundo por ser de rápida execução e apresentar forte desempenho. Trata-se da inserção de estruturas semirrígidas denominadas “grampos”, que são barras de aço envoltas por calda de cimento, numa estrutura a ser estabilizada, como taludes e túneis, com o objetivo de restringir a movimentação e reforçar o maciço instável, com posterior realização de um paramento em concreto projetado mais o sistema de drenagem. O solo grampeado permite a construção de taludes íngremes em corte, o que possibilita um maior aproveitamento do espaço e reduz os custos com escavações.

O presente trabalho tem como objetivo investigar a estabilidade da encosta de uma área de estudo e avaliar uma possível realização da estabilização desse talude por meio da técnica de solo grampeado. Para analisar a estabilidade do talude foi utilizado o programa computacional Geostudio – Slope/W, no qual optou-se em utilizar a teoria do equilíbrio limite, o método das fatias ou das lamelas, por ser o mais utilizado em estudos e aplicações.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Aspectos gerais da estabilização de talude

De acordo com Guidicini e Nieble (1984), os escorregamentos são movimentos de solo muito rápidos, de duração relativamente curta, em que o centro de gravidade se desloca com ação da força gravitacional, para baixo e para fora de uma encosta e ou talude.

Dessa forma, a ocorrência dos deslizamentos nos períodos de grande precipitação pluviométrica, ocorre devido ao peso específico do material ser alterado com a saturação do solo. O excesso de umidade aumenta a pressão neutra e como consequência acarreta na diminuição da resistência ao cisalhamento. E também o aumento desregrado do peso em qualquer ponto do talude forma uma das principais causas de escorregamentos, sendo classificadas como causas externas de deslizamentos, enquanto a ação da chuva é entendida como causa interna, por modificar a estrutura interna do solo (FIDELIS *et al.*, 2021).

Segundo Ranzini e Negro Jr. (1998), a contenção é uma estrutura que se contrapõe a empuxos e tensões geradas em um maciço que teve sua condição de equilíbrio alterada por intervenções como escavações, cortes ou aterros, promovendo uma nova configuração de estabilidade para o maciço de solo.

De acordo com a NBR 16920 – 2 (ABNT, 2021), os solos apresentam boa resistência à compressão e ao cisalhamento. No entanto, sua resistência à tração é baixa. A introdução no maciço de elementos que possuam elevada resistência à tração restringe as deformações que se desenvolvem no maciço devido ao peso próprio do solo, associado ou não à aplicação de carregamento externo.

Nesse contexto, o solo grampeado é uma técnica empregada para a estabilização e contenção de taludes em corte. O processo construtivo consiste na introdução de inclusões passivas no maciço a ser estabilizado. Estas inclusões trabalham essencialmente à tração e são aliadas a um revestimento de face, mas podem, em alguns casos, sofrer esforços cisalhantes e momentos fletores (FRANÇA, 2007).

Segundo a NBR 16920 – 2 (ABNT, 2021) a verificação da estabilidade geral de estruturas de solo grampeado por meio do método de fator de segurança global deve ser efetuada por modelos da mecânica dos solos baseados no equilíbrio-limite. Esta verificação deve levar em conta todas as condicionantes geológicas, geométricas, de sobrecarga, de interferências no entorno e outras. O projeto deve ser enquadrado em uma das classificações de nível de segurança contra a perda de vidas humanas, conforme a Tabela 1, contra danos ambientais e materiais, conforme a Tabela 2 e os fatores de segurança mínimos para estabilidade geral, conforme a Tabela 3.

Tabela 1 – Nível de segurança desejado contra perda de vidas humanas.

<b>Nível de Segurança</b>	<b>Critérios</b>
<b>Alto</b>	<p><u>Áreas com intensa movimentação e/ou permanência de pessoas:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Via principal de ferrovias e rodovias de tráfego intenso.</li> <li>- Via públicas de centros urbanos.</li> <li>- Edificações ocupadas (por exemplo, residências, escolas, estádios, prédios comerciais, indústrias e fabricas).</li> <li>- Construções e/ou áreas com bens ou produtos perigosos (por exemplo, barragens de água e rejeito).</li> </ul>
<b>Médio</b>	<p><u>Áreas com movimentação e permanência de pessoas:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fora da via principal de ferrovias e rodovias de tráfego intenso.</li> <li>- Via principal de ferrovias e rodovias de tráfego moderado.</li> <li>- Vias de serviço.</li> <li>- Áreas de espera de serviços públicos em centros urbanos (por exemplo, plataformas de trem e metrô, pontos de ônibus).</li> <li>- Instalações de edificações (por exemplo, estacionamentos, vias internas, áreas de lazer).</li> </ul>
<b>Baixo</b>	<p><u>Áreas com movimentação e permanência eventual de pessoas:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Vias de ferrovias e rodovias de tráfego reduzido.</li> <li>- Vias rurais.</li> <li>- Áreas públicas abertas em centros urbanos (por exemplo, praças, estacionamentos, parques).</li> <li>- Obras rurais.</li> <li>- Obras temporárias com circulação restrita de pessoas e com equipe de obra e/ou monitoramento em operação.</li> </ul>

Fonte: adaptado de NBR 16920 – 2 (ABNT, 2021).

Tabela 2 - Nível de segurança desejado contra danos materiais e ambientais.

<b>Nível de Segurança</b>	<b>Critérios</b>
<b>Alto</b>	<p><u>Danos materiais:</u> locais próximos a propriedades de alto valor histórico, social ou patrimonial, obras de grande porte e áreas que afetem serviços essenciais por elevado período de tempo.</p> <p><u>Danos ambientais:</u> locais sujeitos a acidentes ambientais graves (por exemplo, oleodutos, aterros sanitários, barragens de rejeito).</p>
<b>Médio</b>	<p><u>Danos materiais:</u> locais próximos a propriedades de valor moderado, vias e estradas principais de acesso e áreas que afetem serviços essenciais por curto período de tempo.</p> <p><u>Danos ambientais:</u> locais sujeitos a acidentes ambientais moderados (por exemplo, vias com circulação de produtos perigosos e fábricas de produtos químicos tóxicos próximos a áreas de proteção ambiental).</p>
<b>Baixo</b>	<p><u>Danos materiais:</u> locais próximos a propriedades de valor reduzido e vias e estradas secundárias de acesso.</p> <p><u>Danos ambientais:</u> locais sujeitos a acidentes ambientais reduzidos.</p>

Fonte: adaptado de NBR 16920 – 2 (ABNT, 2021).

Tabela 3 - Fatores de segurança mínimos para estabilidade geral.

<b>Nível de segurança contra danos materiais e ambientais</b>	<b>Nível de segurança contra danos às vidas humanas</b>		
	<b>Alto</b>	<b>Médio</b>	<b>Baixo</b>
<b>Alto</b>	1,5	1,5	1,4
<b>Médio</b>	1,5	1,4	1,3
<b>Baixo</b>	1,4	1,3	1,2

Fonte: adaptado de NBR 16920 – 2 (ABNT, 2021).

## 2.2 Método de cálculo de análise de estabilização de taludes

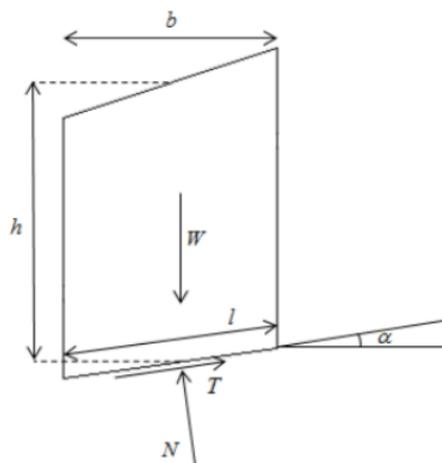
Segundo Paiva (2021), os métodos mais comumente utilizados na avaliação da estabilidade de encostas utilizam a teoria do equilíbrio limite. O método das lamelas ou fatias,

no qual parte potencialmente deslizante, que fica acima da superfície de ruptura, que geralmente tem a forma circular, é dividida em fatias, para que sejam determinadas os esforços atuantes e os esforços resistentes sobre a superfície de ruptura (VILAR; BUENO, 2004).

Segundo Gerscovich (2016), ao elaborar as equações para o equilíbrio limite de um talude utilizando o método de fatias, a quantidade de incógnitas é de número superior à de equações disponíveis, com isso, o problema acaba se tornando estaticamente indeterminado. Portanto, para sua solução, criaram-se algumas hipóteses em relação à direção na qual é realizado o equilíbrio de forças nas fatias, o que torna o problema solucionável, mas com certa diferença nos resultados.

O método de Fellenius (apresentado em 1936), representado na Figura 1, foi o primeiro a introduzir um método de análise para uma superfície de deslizamento circular, onde o fator de segurança (FS) de um maciço é gerado através das equações lineares de força, não sendo, por isso, necessário qualquer processo iterativo. Nesse modelo, as forças de interação entre fatias são consideradas como paralelas à inclinação média e, portanto, se anulam, não exigindo processos iterativos e simplificando as análises de cálculos, mesmo sendo essa, uma representação na qual não se reflete a realidade (GERSCOVICH, 2016). É considerado um método conservativo, tende a fornecer baixos valores de FS e em círculos muito profundos e com elevados valores de poropressão, o método fornece valores poucos confiáveis. (FERREIRA, 2012).

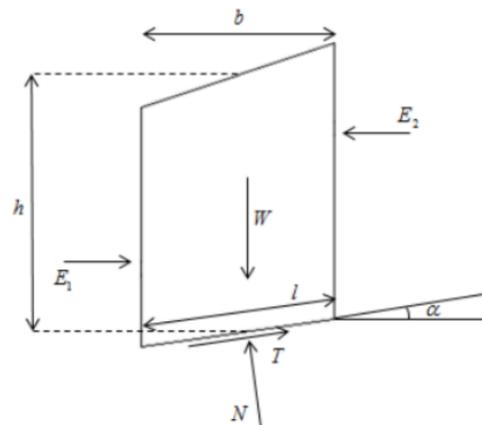
Figura 1 – Método de Fellenius.



Fonte: Ferreira (2012).

Bishop, em 1955, apresentou um modelo iterativo em que se satisfaz o equilíbrio de momentos, representado na Figura 2, com a premissa na qual se ignora as forças cisalhantes entre as fatias. Esse método de cálculo apresenta bons resultados em superfícies circulares e não-circulares (FERREIRA, 2012; GERSCOVICH, 2016).

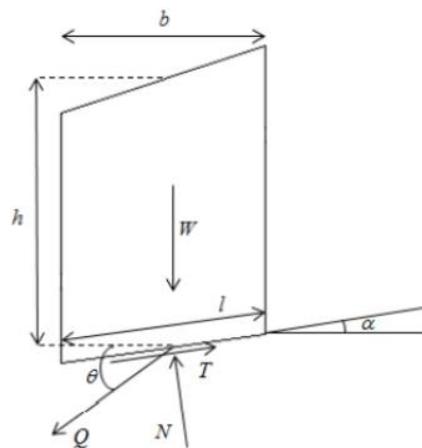
Figura 2 – Método Bishop.



Fonte: Ferreira (2012).

O método de Spencer, apresentado em 1967, é considerado como sendo um método rigoroso uma vez que satisfaz todas as equações de equilíbrio (forças e momentos). Neste método as forças de interação entre fatias (X e E) são substituídas por uma resultante estaticamente equivalente, Q, atuante no ponto médio da base da respectiva fatia, como mostra a Figura 3 (FERREIRA, 2012).

Figura 3 – Método Spencer.



Fonte: FERREIRA (2012).

O método de Morgenstern-Price foi apresentado em 1965 e cumpre todas as condições de equilíbrio, pertencendo por isso ao grupo dos métodos rigorosos. A aplicação do método recorre a equações diferenciais que governam o equilíbrio de momentos e o equilíbrio de forças numa fatia (FERREIRA, 2012).

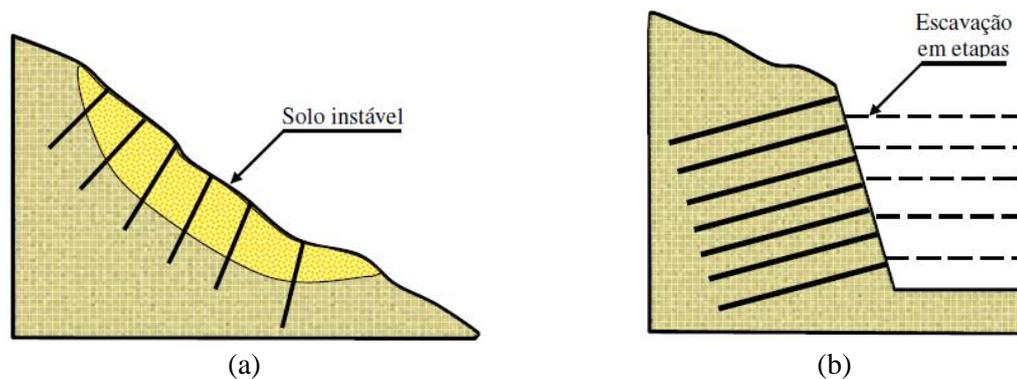
Segundo Vilar e Bueno (2004), esse fator de segurança é a razão entre o somatório dos momentos resistentes, oriundos das forças que favorecem o equilíbrio do maciço, e dos momentos atuantes, originados das forças que provocam o deslizamento.

### 2.3 Solo Grampeado

A NBR 16920 – 2 (ABNT, 2021) descreve que o solo grampeado é uma técnica de estabilização, temporária ou permanente, de taludes naturais e escavações, por meio da introdução de reforços no maciço, normalmente aliada ao revestimento da face. Os elementos de reforço são capazes de resistir aos esforços e às deformações no interior do maciço e de apresentar adequada resistência à degradação.

Na estabilização de taludes, a função do reforço é promover um aumento no fator de segurança ou reduzir os deslocamentos. Em taludes naturais, Figura 4 – a, este tipo de aplicação não exige serviços de escavação e os grampos são, em geral, instalados perpendiculares à superfície potencial de ruptura. A contenção de taludes em corte, Figura 4 – b, por outro lado, exige escavações (execução de corte), que são feitas em etapas alternadas, com os serviços de instalação dos grampos implantados horizontal ou sub-horizontalmente, e o revestimento da face. Outra diferença entre as duas aplicações refere-se aos esforços que solicitam o reforço. Na estabilização de talude são mobilizadas principalmente as resistências ao cisalhamento e a momentos fletores dos grampos, enquanto que os principais esforços solicitantes na contenção de taludes em cortes são as forças de tração (FRANÇA, 2007).

Figura 4 - Aplicação do solo grampeado: (a) estabilização de talude naturais; e (b) estabilização de taludes em corte devido ao processo de escavação.



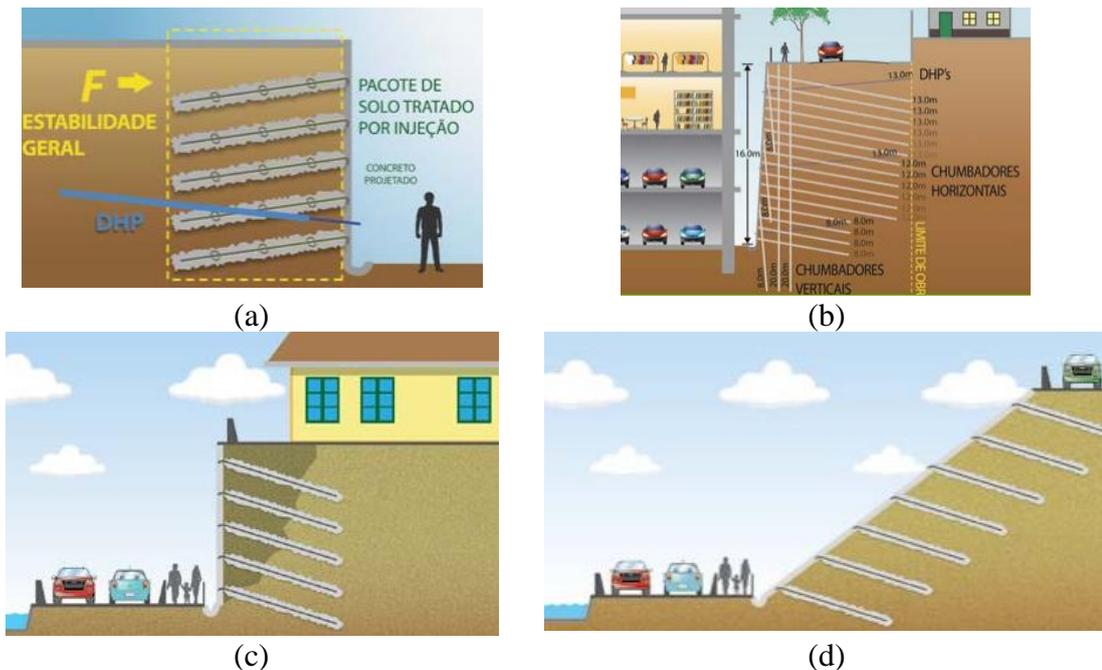
Fonte: França (2007).

A NBR 16920 – 2 (ABNT, 2021), destaca que o termo “solo grampeado” se refere à aplicação de reforços resistentes à tração em maciços, de forma a se obter um compósito com melhores características mecânicas. O sistema é composto por três elementos: solo, grampos e paramento. Esta técnica considera a inclusão de elementos de reforço metálicos ou poliméricos e de sistema de drenagem interna.

No solo grampeado o contato do solo e reforço se dá ao longo de toda a extensão do grampo, havendo deste modo a transferência de esforços ao longo de todo o trecho localizado dentro da encosta. Na construção de uma estrutura em solo grampeado os grampos têm seu

comprimento limitado geralmente até no máximo a altura da escavação (SILVA, 2009). Esta técnica se aplica a cortes para implantação de subsolos ou cortes com geometria instável, taludes existentes sem estabilidade satisfatória e taludes rompidos, como mostra a Figura 5 (SOLOTRAT ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 2020).

Figura 5 – Técnica para estabilização de taludes em solo grampeado: (a) estabilidade geral do maciço; (b) corte para implantação de subsolo; (c) talude rompido; e (d) taludes instáveis.



Fonte: Solotrat Engenharia Geotécnica (2020).

Clouterre (1991) se refere ao método como reforço do solo realizado de cima para baixo à medida que a área é escavada, através da introdução de barras passivas que basicamente agem sob tração. Barras que usualmente são alocadas paralelamente umas às outras ou até mesmo levemente inclinadas na horizontal. Trabalhando dessa forma, uma massa de solo reforçada *in situ* é gradualmente construída.

### 2.3.1 Aplicabilidade

A técnica de grampeamento do solo pode ser aplicada em uma vasta diversidade de solos, e se realizada em condições favoráveis pode se mostrar bastante vantajosa e econômica, como em solos finos e rígidos com baixa plasticidade ou solos granulares compactos com alguma coesão aparente. Porém, em condições desfavoráveis, como solos granulares fofos, sem coesão, mal graduados ou com alto teor de umidade, podem tornar a obra inviável (SILVA, 2009).

Entre as vantagens do solo grampeado destacam-se a utilização de equipamentos caracterizados pelo seu pequeno porte, a sequência construtiva também é considerada uma

vantagem, pois permite realizar diferentes serviços simultaneamente (escavação, instalação dos grampos e revestimento de face). Dessa forma, com um bom planejamento é possível alcançar alta velocidade de execução e em locais onde outras técnicas trariam complicações (superfícies inclinadas, em curvas ou com bermas). Ainda, o solo grampeado permite que parâmetros como espaçamento entre grampos, profundidade de escavação e comprimento dos grampos sejam alterados no decorrer da execução, o que aumenta a flexibilidade da técnica. Outra característica é que esse método utiliza como elemento estrutural somente os grampos, o que acarreta em um custo relativamente baixo em relação às soluções convencionais. A combinação das vantagens citadas acima, juntamente com a simplicidade de execução, garante uma opção de baixo custo em obras de reforço de solos. (FRANÇA, 2007).

Apesar de apresentar diversas vantagens, essa metodologia também apresenta algumas limitações. Um exemplo são os deslocamentos horizontais e verticais, que se mostram inerentes à aplicação da técnica, e por isso devem ter sua magnitude analisada, para que sejam controlados e monitorados a fim de que não haja danos ou apresente riscos a estruturas vizinhas.

Dessa forma, é certo concluir que alguns solos não são apropriados para o grampeamento. França (2007) destaca que é necessário que o solo seja autoportante por algumas horas, período entre a escavação e a aplicação do revestimento da face, e caso essa capacidade de suporte não seja atingida, torna necessário um pré-tratamento da face visando estabilizar o maciço, porém essa solução encarece o projeto, muitas vezes o inviabilizando.

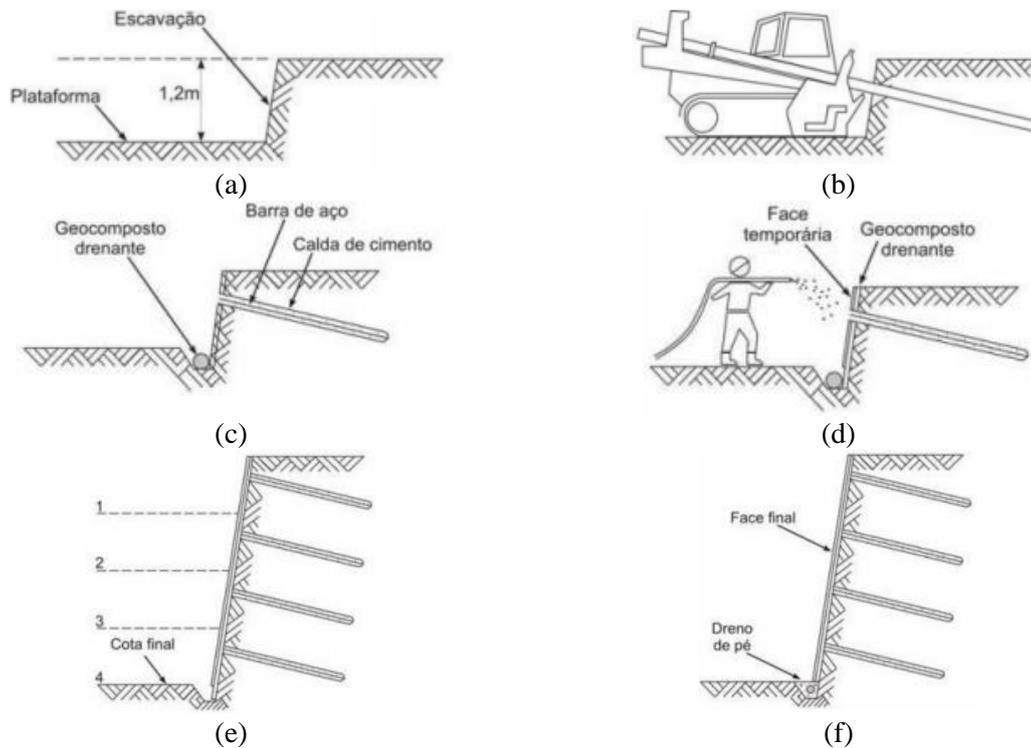
### **2.3.2 Processo Executivo**

As etapas do processo construtivo do solo grampeado em taludes consistem em escavar até a cota que serve de plataforma de trabalho, perfurar e inserir o grampo e injetá-lo com calda de cimento e posteriormente aplicar o concreto projetado na face do talude remanescente.

Segundo Clouterre (1991), uma parede de solo grampeado é construída em fases sucessivas de cima para baixo, compreendendo: (i) escavação, geralmente limitada a 1 ou 2 metros de profundidade e possivelmente limitada em comprimento dependendo do tipo de terreno a estabilizar; (ii) introdução de pregos sub horizontais ou inclinados no solo *in situ*; (iii) construção de uma parede de fachada no local (concreto projetado sobre tela de arame soldado ou concreto fibroso) ou instalação de elementos pré-moldados (ou painéis) que podem ser tratados arquitetonicamente de várias formas.

Na Figura 6 são mostradas as fases típicas para a estabilização da encosta utilizando o método do solo grampeado.

Figura 6 – Fases típicas de execução de estabilização de talude em solo grampeado: (a) escavação do talude; (b) perfuração do solo; (c) introdução dos grampos; (d) injeção da bainha; (e) drenagem; e (f) revestimento da face.



Fonte: Silva (2009).

### 2.3.2.1 Escavação

Segundo França (2007), a primeira etapa na sequência executiva dos solos grampeados é a escavação, que é realizada em estágios, comumente com profundidades de 1 a 2 m. Alguns autores relatam profundidades diferentes de escavação como Vucetic *et al.* (1993) que sugerem entre 1,2 a 1,8 m e Raju *et al.* (1997), de 1 a 1,5 m. Gassler (1990) apresenta uma sugestão de possíveis profundidades de escavação, Tabela 4, em cortes verticais, em função do tipo de solo.

Tabela 4- Altura das etapas de escavação.

Tipo de Solo	Profundidade de Escavação (m)		
	<b>Pedregulho</b>	0,5 Com coesão aparente	1,5 Solo com cimentação
<b>Areia</b>	1,2 Medianamente compacta, com coesão aparente	1,5 Compacta, com coesão aparente	2,0 Com cimentação
<b>Silte</b>	1,2	2,0 Com cimentação	
<b>Argila</b>	1,5 Normalmente consolidada	2,5 Sobreadensada	

Fonte: adaptado de Gassler (1990).

A escavação pode ser realizada de forma manual ou com auxílio de máquinas. A escolha é feita pelo executor dentro das possibilidades aplicadas a cada obra. As alturas das bancadas de execução variam de 0,5 a 2 m dependendo da inclinação da face e do tipo do solo, uma vez que a superfície escavada deve permanecer estável por um tempo suficiente para inserção dos grampos e execução da face (BELONI, 2010).

Segundo Silva (2009), para garantir a estabilidade do maciço durante a escavação, o solo deve apresentar uma coesão, a curto prazo, de pelo menos 10 kPa. Entretanto, recomenda-se que a primeira fase da escavação seja realizada com uma altura inferior a dimensionada, para permitir a estabilização em tempo suficiente, caso tenha ocorrido uma avaliação errônea dos parâmetros do solo.

### **2.3.2.2 Introdução dos Grampos**

A função dos grampos é de reduzir os deslocamentos do maciço originados pelo acréscimo de forças internas que são contrárias ao sistema natural de acomodação da massa. Os deslocamentos laterais são gerados pela descompressão progressiva do solo, devido às etapas de escavação, ou pela configuração de ruptura do maciço (SARÉ, 2007).

Na NBR 16920 – 2 (ABNT, 2021), são descritos diversos tipos de grampos que podem ser adotados, dependendo das técnicas de instalação, de sua eficiência mecânica e de sua durabilidade, entre eles: (i) grampos perfurados e preenchidos com material ligante: consiste na perfuração do solo com diâmetros que variam de 75 mm a 150 mm, com barras de aço ou outros elementos resistentes à tração introduzidos no furo, com preenchimento da bainha com calda de cimento ou outro material ligante; (ii) grampos autoperfurantes: grampos não reinjetados, constituídos por elemento monobarra vazado, cuja perfuração é realizada com sua própria barra e acessórios, e injetado simultaneamente com calda de cimento ou outro fluido ligante, os acessórios de perfuração ficam incorporados ao grampo; e (iii) grampos cravados: barras de aço cravadas no maciço, sendo comumente de seção circular ou cantoneiras. Nestes grampos, não há bainha. A necessidade de proteção contra corrosão deve ser justificada com a previsão de espessuras de sacrifício.

A introdução dos grampos pode ser feita na horizontal ou com uma pequena inclinação que em geral varia no intervalo de 5° a 15° com a horizontal. Como fluido de perfuração e limpeza do furo pode ser utilizada água, ar ou lama. Se a opção for por trados, não é necessário o uso de fluidos (TEIXEIRA, 2011).

A NBR 16920 – 2 (ABNT, 2021), relata que o processo executivo da bainha tem por objetivo o preenchimento integral do furo. O preenchimento do furo com material ligante deve

ser realizado de forma ascendente, ou seja, deve-se introduzir um tubo auxiliar até o fundo da perfuração, procedendo-se então ao bombeamento do material ligante até que ele extravase pela boca do furo. O bombeamento deve ser mantido até que o material ligante extravasado esteja visualmente isento de resíduos da perfuração.

A NBR 16920 – 2 (ABNT, 2021) relata sobre a proteção contra corrosão da armação do grampo. Ao longo da vida útil contando a partir da sua instalação, deve assegurar que: (i) até dois anos para grampos provisórios; e (ii) mais do que dois anos para grampos permanentes.

A barra de aço não deve perder suas características de resistência ao longo do tempo. Portanto, deve receber tratamento anticorrosivo adequado, usualmente por meio de resinas epóxicas ou proteção eletrolítica. No caso do grampo injetado, a própria camada de cimento (de pelo menos 20 mm) fornece uma proteção considerável à barra metálica (SPRINGER, 2006)

### **2.3.2.3 Revestimento da Face**

A NBR 16920 – 2 (ABNT, 2021) relata que o revestimento das faces (paramentos) utilizados no solo grampeado são parte do sistema construtivo e fornecem proteção contra erosão superficial, tendo ou não função estrutural na estabilidade do conjunto. Podem ser rígidos ou flexíveis, constituídos por concreto projetado, armado ou não, concreto armado moldado *in loco*, alvenaria estruturada, elementos pré-moldados de concreto, telas metálicas tecidas ou geossintéticos, associadas ou não à face vegetada ou outros elementos que atendam à mesma função. Os elementos metálicos de face, se definitivos, devem ser protegidos contra corrosão.

O concreto projetado pode ser aplicado por via seca e úmida. A aplicação por via seca é mais utilizada devido a sua praticidade, pois é possível interromper e reiniciar os serviços sem perdas de material e tempo para limpeza do equipamento (ZIRLIS; SOUZA; PITTA, 1992).

A aplicação por via úmida é mais apropriada para trabalhos maiores devido ao tamanho dos equipamentos necessários (FRANÇA, 2007).

### **2.3.2.4 Drenagem**

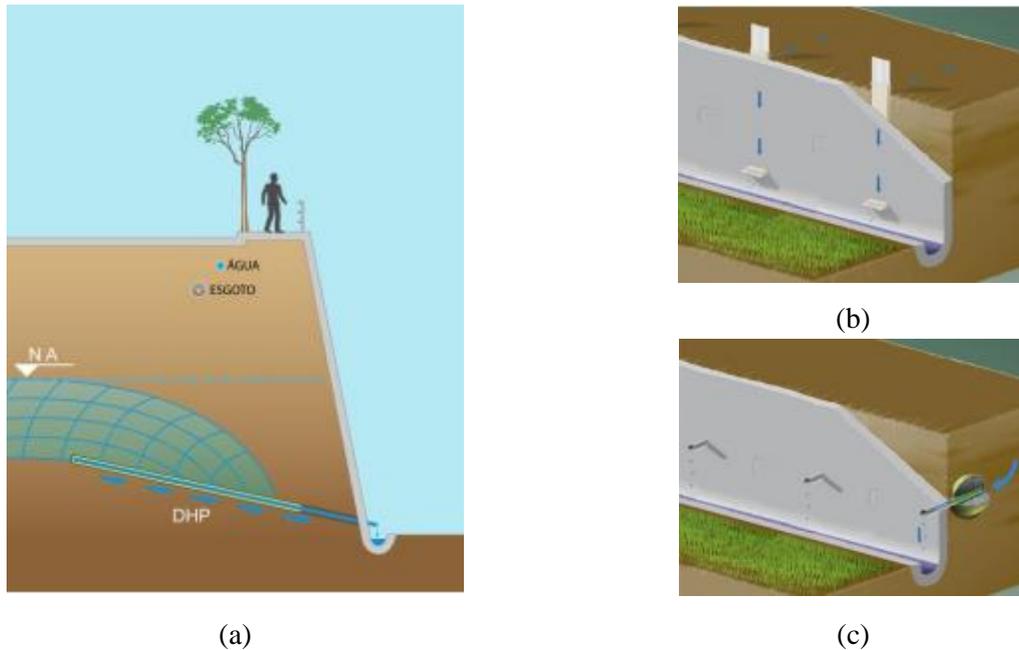
Diante da incidência inevitável das chuvas no solo é imprescindível que a estrutura esteja protegida por um sistema de drenagem eficiente, que impeça a geração de poropressão no interior do maciço, caso contrário, carregamentos na face podem causar deslizamento ou ruptura do solo (SPRINGER, 2001).

Uma regra geral para a execução de solos grampeados é que terreno deve estar acima do nível d'água ou ainda que este deve ser rebaixado antecipadamente. Contudo, mesmo tomando essas medidas, é necessário evitar a percolação de água de outras fontes, como a chuva

ou vazamentos em tubulações. A proteção consiste basicamente na execução de drenos profundos e de aparatos para drenagem superficial. Devem ser utilizados drenos de paramento com a função de promover a drenagem das águas vindas do talude, que chegam ao paramento (FRANÇA, 2007).

O sistema de drenagem do solo grampeado objetiva oferecer um fluxo organizado para as águas internas ou externas que a ele convergem. Durante a execução devem ser conferidas e ajustadas as posições dos drenos previstos na fase do projeto. Para a drenagem profunda, Figura 7 – a, usa-se o Dreno Sub-Horizontal Profundo (DHP). Para a drenagem de superfície aplicam-se os drenos de paramento linear contínuo, Figura 7 – b, e dreno de paramento pontual, Figura 7 – c (PITTA; SOUZA; ZIRLIS, 2013).

Figura 7 - Sistema de drenagem em solo grampeado: (a) Drenagem profunda (DHP); (b) Dreno de paramento linear contínuo; (c) Dreno de paramento pontual, barbacã.



Fonte: Pitta; Souza; Zirlis (2013).

Segundo Lima (2009), os drenos profundos devem ser mais compridos que os grampos de forma a protegê-los, com a função de captar as águas distantes da face do talude e conduzi-las às canaletas localizadas no lado externo.

Os drenos tipo barbacã são responsáveis por uma drenagem pontual e devem ser projetados para abranger toda a superfície do faceamento (LIMA, 2009). De acordo com França (2007), os drenos lineares contínuos são colocados na direção vertical atrás da parede do paramento, da crista até o pé do talude.

São considerados drenos de superfície as canaletas de crista e pé, bem como as de descida d'água. Como nestas peças ocorre acúmulo de águas, seu efeito erosivo no despejo deve ser cuidadosamente analisado (PITTA; SOUZA; ZIRLIS, 2013).

Na crista e no pé do paramento devem ser previstas canaletas (moldadas *in loco* ou pré-moldadas) para receberem as contribuições da parte superior do talude e dos drenos tipo barbacã, verticais contínuos e sub-horizontais (MIRANDA, 2019).

### **2.3.3 Métodos de dimensionamento de solo grampeado**

De acordo com Lanzieri (2019), os métodos de dimensionamento analíticos, em grande parte são baseados na teoria do equilíbrio limite e as principais diferenças entre eles se dão na geometria da superfície de ruptura e esforços envolvidos (tração, cisalhamento e momento fletor). Segundo Ehrlich e Becker (2011), no dimensionamento pelo equilíbrio limite, as hipóteses básicas adotadas são: (i) estrutura em situação de colapso iminente; (ii) superfície de ruptura conhecida; (iii) comportamento rígido do solo, perfeitamente plástico; (iv) inclinação e distribuição dos reforços ao longo da superfície de ruptura são conhecidas; e (v) mobilização total da resistência ao cisalhamento do solo ao longo de toda a superfície de ruptura.

O dimensionamento do solo grampeado em relação à estabilidade externa pode ser realizado, considerando o maciço reforçado como uma estrutura monolítica, com comportamento semelhante a um muro de gravidade. Assim, o monólito formado pela região reforçada do maciço deve ter base com largura suficiente para resistir aos esforços gerados pelo empuxo ativo do maciço à montante dos reforços. As análises que devem ser empreendidas na avaliação da estabilidade externa são as mesmas de um muro de gravidade tradicional, tais como deslizamento do contato entre a base e o solo de fundação, tombamento em torno do pé, plastificação sob o pé do muro devido ao desenvolvimento de tensões acima da capacidade de carga do solo de fundação e ruptura generalizada do maciço, com a superfície de ruptura passando por trás dos grampos. (LANZIERI, 2019 apud EHRLICH, 2003).

No caso das análises de estabilidade interna, deve-se verificar a possibilidade de arrancamento do reforço e da ruptura da barra de aço que compõe o grampo. No caso do arrancamento, o comprimento dos grampos deve ser tal que possa resistir, devido à resistência ao cisalhamento na interface solo-grampo da zona resistente, aos esforços impostos pela zona ativa. No caso da ruptura da barra, deve-se garantir que a resistência à tração de sua seção de aço seja suficiente para resistir aos esforços a ela impostos (LANZIERI, 2019 apud CLOUTERRE, 1991).

De acordo com Lanzieri (2019), na literatura é possível encontrar diversas metodologias de cálculo de estabilização de taludes por meio de solos grampeados desenvolvidas por autores ao longo dos anos, metodologias nas quais podemos dividir em duas categorias: (i) métodos que consideram apenas esforços de tração nos grampos; (ii) métodos que consideram esforços de tração, cisalhamento e flexão nos grampos.

Segundo FHWA-NHI-14-007 (2015), os grampos devem ser instalados de 10 a 20 graus da horizontal, e mais frequentemente a 15 graus. Os grampos do solo são instalados num padrão de grelha. O espaçamento horizontal do grampo ( $\delta_H$ ), é frequentemente o mesmo que o espaçamento vertical dos grampos ( $\delta_V$ ). O espaçamento em ambos os sentidos varia geralmente de 1,2 a 1,8 metros e ocasionalmente até 2,0 metros, e é utilizado a 1,5 metros.

Para pré-dimensionamentos, deve-se utilizar aproximadamente o valor de 0,7 vezes a altura da escavação (H). Recomenda-se que o seu valor esteja entre 0,5 H e 1,2 H, embora sejam raras as situações em que o comprimento dos grampos seja menor do que 0,6 H. Se necessário valores de L maiores do que 1,2 H, deve-se reavaliar se o solo grampeado é a melhor solução para o reforço do maciço (CLOUTERRE, 1991).

Para Clouterre (1991), o comprimento deve obedecer às seguintes especificações:  $0,5 \leq L \leq 0,7 H$  para grampos cravados, quando estes estão bem próximos entre si (cerca de 1 ou 2 grampos por metro quadrado);  $0,8 \leq L \leq 1,2 H$  para grampos perfurados, quando estes possuem uma distribuição de aproximadamente 1 grampo para cada 2,5 a 6 m<sup>2</sup>.

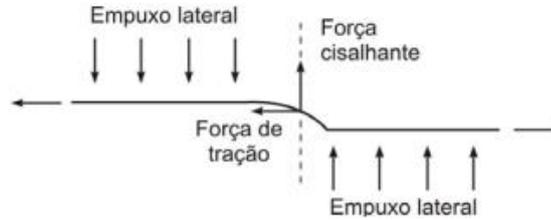
## 2.4 Interação Solo-Grampo

O processo de interação solo-reforço envolve essencialmente dois mecanismos que contribuem para a melhoria da estabilidade do maciço de solo, como representado na Figura 8. O primeiro mecanismo refere-se à resistência ao cisalhamento desenvolvida na interface solo-reforço conhecida como  $q_s$ . Este mecanismo induz o desenvolvimento de tensões de tração nos elementos de reforço. A segunda e não menos importante interação, refere-se ao esforço normal (empuxo) que o solo exerce sobre o reforço. Esta solicitação faz com que seja desenvolvida uma zona cisalhante no interior da massa de solo, que, conseqüentemente, promove uma mobilização de momento fletor e de esforço cisalhante no reforço. Estes mecanismos, ainda não se encontram totalmente esclarecidos, fato este que resulta no empirismo dos atuais métodos de projeto (SILVA, 2009).

De acordo com Springer (2006) a estabilidade de uma contenção em solo grampeado é analisada em seu estado limite último, portanto, a obtenção de  $q_s$  é essencial para o projeto de

estruturas grampeadas. A carga axial de tração ( $T_n$ ) nos grampos é introduzida como força estabilizante, que corresponde à resistência ao arrancamento mobilizada.

Figura 8 – Mecanismo de interação solo-reforço na estrutura de solo pregado.



Fonte: Sheahan & Alvarado, 1996 apud Silva, 2009.

Para entendermos a associação entre grampo e solo é necessário conhecer os parâmetros e propriedades do solo e as características e método de execução dos grampos, que resultam no mecanismo de resistência ao cisalhamento entre esses dois elementos (LIMA, 2007; SOUZA, 2019). De acordo com Lazarte et al. (2003) apud Teixeira (2011), os esforços axiais podem aumentar moderadamente (em geral, cerca de 15%) no intervalo de tempo entre o final da construção e a longo-prazo.

A NBR 16920 – 2 (ABNT,2021), recomenda que a carga máxima a ser aplicada deve ser limitada à resistência de cálculo da barra de aço, conforme a Equação 1.

$$T_{\text{último}} \leq \frac{A_s \cdot f_{yk}}{\gamma_s} \quad (1)$$

Onde,  $T_{\text{último}}$  é a carga última da armação do grampo utilizado no ensaio, expressa em kN;  $A_s$  é a área da seção transversal da armação do grampo, expressa em  $\text{m}^2$ ;  $f_{yk}$  é a tensão de escoamento característica do aço empregado, expressa em kPa; e  $\gamma_s$  é o coeficiente de minoração da resistência da armação do grampo, para barras de aço, é considerada 1,15.

Ainda, de acordo com a NBR 16920 – 2 (ABNT, 2021), destaca-se que a carga de ensaio deve ser prevista para o arrancamento do grampo, de acordo com a Equação 2.

$$T_{\text{ensaio}} = L_b \cdot \pi \cdot \phi_{\text{furo}} \cdot q_s \leq T_{\text{último}} \quad (2)$$

Onde,  $T_{\text{ensaio}}$  é a carga máxima prevista, em kN;  $L_b$  é o comprimento do grampo, em m;  $\phi_{\text{furo}}$  é o diâmetro de perfuração do grampo, em m; e  $q_s$  é a resistência da interface solo-grampo, expressa em kPa.

Considerando que a carga máxima ( $T_{\text{ensaio}}$ ) deve ser limitada à resistência de cálculo da barra de aço, conforme a equação 1, sendo assim, tem-se a Equação 3.

$$T_{\text{ensaio}} = T_{\text{último}} = \frac{A_s \cdot f_{yk}}{\gamma_s} \quad (3)$$

Sabe-se que a carga máxima prevista ( $T_{ensaio}$ ) depende do comprimento do grampo, do diâmetro de perfuração do grampo e da resistência da interface solo-grampo, de acordo com a Equação 4.

$$T_{ensaio} = T_{último} = L_b \cdot \pi \cdot \Phi_{furo} \cdot q_s \quad (4)$$

A única variável desconhecida é  $q_s$ , sendo assim, manipulando a equação 4 e isolando  $q_s$ , obtém-se a Equação 5.

$$q_s = \frac{T_{último}}{L_b \cdot \pi \cdot \Phi_{furo}} \quad (5)$$

A NBR 16920 – 2 (ABNT,2021) relata que a resistência característica estrutural à tração do grampo ( $R_{tk}$ ) é determinada tomando como base a tensão de escoamento característica ( $f_{yk}$ ) e a área da seção transversal útil ( $A_{útil}$ ) da armação, de acordo com a Equação 6.

$$R_{tk} = f_{yk} \cdot A_{útil} \quad (6)$$

Além disso, a NBR 16920 – 2 (ABNT, 2021) destaca que a resistência a tração de cálculo do grampo é determinada conforme a Equação 7.

$$R_{td} = \frac{f_{yk} \cdot A_{útil}}{\gamma_m} = \frac{R_{tk}}{\gamma_m} \quad (7)$$

#### 2.4.1 Resistência ao Cisalhamento de Interface Solo-Reforço

O mecanismo de interação mais importante nos solos grampeados, em contenções de escavações, é a mobilização da resistência ao cisalhamento da interface entre o solo e o grampo ao longo das inclusões (SCHLOSSER, 1982; SCHLOSSER; BUHAN, 1990).

Bruce e Jewell (1986) declaram que o solo grampeado aumenta a resistência ao cisalhamento do solo com os grampos atuando sob tensão de tração. A tensão cisalhante na interface solo-grampo é, portanto, o principal parâmetro de projeto.

Silva (2010) cita e detalha alguns aspectos que influenciam na resistência de cisalhamento solo-grampos: (i) fenômeno de dilatação em solos granulares compactos; (ii) processo de injeção da calda de cimento; (iii) teor de umidade no solo; (iv) deformação interna do maciço reforçado; (v) inclinação do grampo com a horizontal; e (vi) método executivo da perfuração.

A resistência ao cisalhamento da interface entre o solo e o grampo sofre influência principalmente do tipo de grampo e do teor de umidade do solo. Os grampos instalados em furos preenchidos com calda de cimento por gravidade apresentam grande variabilidade no atrito da interface. Quanto mais lisas forem as paredes do furo, menores esses valores. A perfuração reduz a tensão normal a zero nas paredes do furo, então, a tensão normal inicial depois da instalação dos grampos é muito baixa. A resistência ao cisalhamento de interface em curto prazo pode ser altamente influenciada pelo grau de saturação do solo caso este possua certa quantidade de finos (CLOUTERRE, 1991 apud FRANÇA, 2007).

A mobilização de resistência ao cisalhamento de interface requer deslocamentos relativos entre o solo e o grampo da ordem de milímetros, bem como ocorre em estacas com relação à mobilização do atrito lateral. As deformações internas da massa reforçada induzem a mobilização da resistência ao cisalhamento de interface ao longo dos grampos e o posterior tracionamento. Estas deformações ocorrem devido ao desconfinamento do solo à medida que a escavação prossegue (FRANÇA, 2007).

#### **2.4.2 Empuxo lateral do solo**

Embora a resistência ao cisalhamento de interface domine o mecanismo de interação solo-reforço, o empuxo do solo também pode estar atuando sobre o reforço. Para tal, é necessário que o reforço apresente rigidez e que seja desenvolvida uma zona de cisalhamento no interior do maciço de solo (SILVA, 2009).

Uma estrutura mais flexível irá se deformar até a obtenção do equilíbrio. Este tipo de interação é mais comum no emprego da técnica de solos grampeados para a estabilização de taludes. Também pode ocorrer em obras de contenção com fator de segurança baixo, sendo menos expressiva que a mobilização da resistência ao cisalhamento da interface entre o solo e o grampo (FRANÇA, 2007).

Juran *et al.* (1983) apud França (2007) mostraram que são necessários grandes deslocamentos relativos do solo para mobilizar a resistência contra o empuxo lateral de terra. Eles ressaltam que, como consequência disso, qualquer aplicação que precise da mobilização da resistência ao cisalhamento dos reforços deve ser projetada com respeito a deslocamentos admissíveis das estruturas circundantes. De forma geral, em condições de serviços, a resistência à flexão dos grampos é mobilizada modestamente.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo do trabalho serão apresentados os dados da área de estudo, os métodos, técnicas, bem como o processo metodológico adotado a fim de alcançar os objetivos estabelecidos. O levantamento planialtimétrico e as fotos da área de estudo utilizadas são oriundos de um banco de dados disponibilizados por uma empresa, que será denominada de “Empresa X”. Além disso, devido à ausência de resultados de ensaios de campo e laboratório para os solos da área estudada, de forma a viabilizar o desenvolvimento do trabalho foram utilizados resultados de ensaios triaxiais adensados e não drenados (CIU) de diferentes tipos de solos e localização, esses dados foram disponibilizados por outra empresa, que será denominada de “Empresa Y”.

Para realização das análises de estabilidade da encosta empregou-se o software Slope/W (GEOSTUDIO), versão 2021.4, disponibilizada pela empresa durante um breve período de tempo.

#### 3.1 Área de estudo

A área de estudo fica localizada em um município do interior do estado de Minas Gerais, onde há a construção de um posto de saúde comunitário, que recentemente passou por uma reforma e foi solicitada a análise de estabilização da encosta para a avaliação do risco geotécnico do talude em questão, conforme a Figura 9. Foram disponibilizados pela Empresa X o levantamento topográfico e vistoria técnica feita no local, a fim de avaliar possível ruptura da encosta.

Figura 9 – Área de estudo.



Fonte: Empresa X (2022).

### 3.2 Coleta de dados para análise

#### 3.2.1 Ensaio Triaxial – CIU

A empresa Y disponibilizou o resultado de três ensaios triaxiais de diferentes tipos de solos, que foram adotados como sendo os solos constituintes da encosta estudada. Nos resultados dos ensaios foram obtidos os parâmetros geotécnicos, tais como coesão ( $c$ ) e ângulo de atrito ( $\phi$ ) em termos tensões totais, coesão efetiva ( $c'$ ) e ângulo de atrito efetivo ( $\phi'$ ) em termos de tensões efetivas, e também os pesos específicos ( $\gamma$ ) dos solos. Os parâmetros de resistência obtidos por meio dos ensaios triaxiais estão mostrados na Tabela 5.

É importante ressaltar que os dados dos ensaios triaxiais não se referem e nem se assemelham aos solos da região do talude e seus arredores, foram aplicados à encosta apenas para o desenvolvimento desse trabalho, reproduzindo um estudo de caso fictício que não corresponde aos parâmetros encontrados na região da encosta, visto que não foi possível ter acesso a ensaios de laboratório e/ou sondagem da área estudada. Como também não foi possível ter acesso a estratigrafia do local, as camadas e os tipos de solo foram determinados de forma hipotética.

Tabela 5 – Parâmetros geotécnicos dos solos.

Solo 1		Solo 2		Solo 3	
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	15	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	16	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	17
<b>Parâmetros Totais</b>		<b>Parâmetros Totais</b>		<b>Parâmetros Totais</b>	
$\phi$ (°)	12,60	$\phi$ (°)	16,50	$\phi$ (°)	20,40
<b>c (kPa)</b>	1,94	<b>c (kPa)</b>	25,80	<b>c (kPa)</b>	54,10
<b>Parâmetros Efetivos</b>		<b>Parâmetros Efetivos</b>		<b>Parâmetros Efetivos</b>	
$\phi'$ (°)	28,29	$\phi'$ (°)	32,1	$\phi'$ (°)	33,30
<b>c' (kPa)</b>	6,88	<b>c' (kPa)</b>	10,30	<b>c' (kPa)</b>	7,40

Fonte: Autoras (2022).

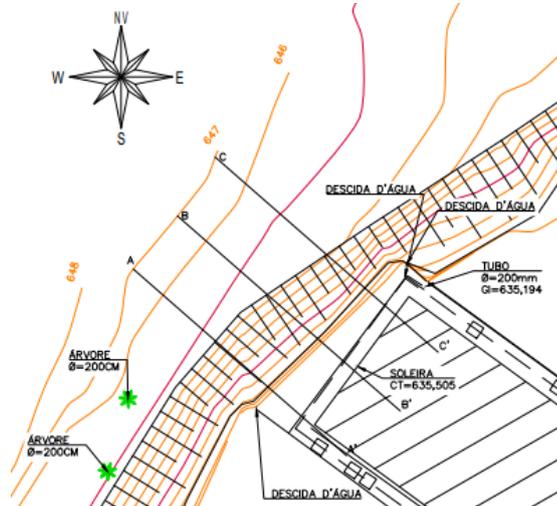
#### 3.2.2 Levantamento topográfico

Foi feito um levantamento planialtimétrico da área de estudo para obter o perfil topográfico do talude e as características da superfície do terreno de forma mais detalhada como por exemplo árvores, vegetação em geral, relevo com curva de nível, além das divisas, muros, construções e descidas d'água, como mostra a Figura 10.

Foram traçadas três seções de corte ao longo da encosta para a realizar a análise de estabilidade do talude, sendo elas, AA, BB e CC. As seções foram definidas de forma a abranger a maior área do talude onde a contenção deverá ser projetada, visando conhecer o talude em sua

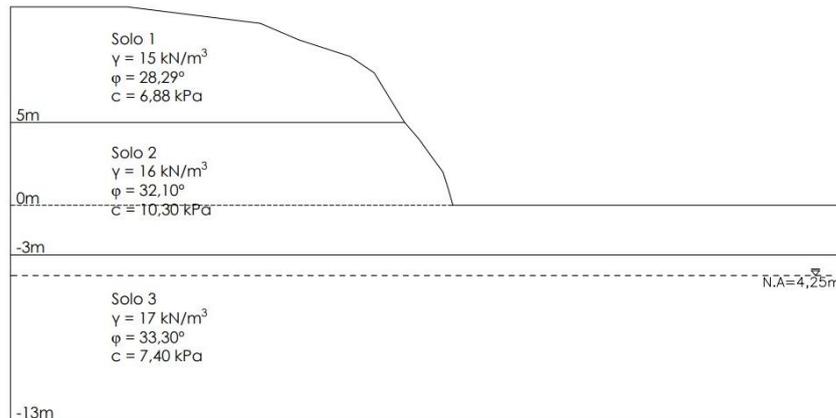
totalidade. Nas Figuras 11, 12 e 13, serão apresentadas o solo na encosta para as seções de corte definidas, destacando os parâmetros geotécnicos dos solos 1, 2 e 3, de acordo com a Tabela 5.

Figura 10: Curva de nível com as seções dos perfis topográficos.



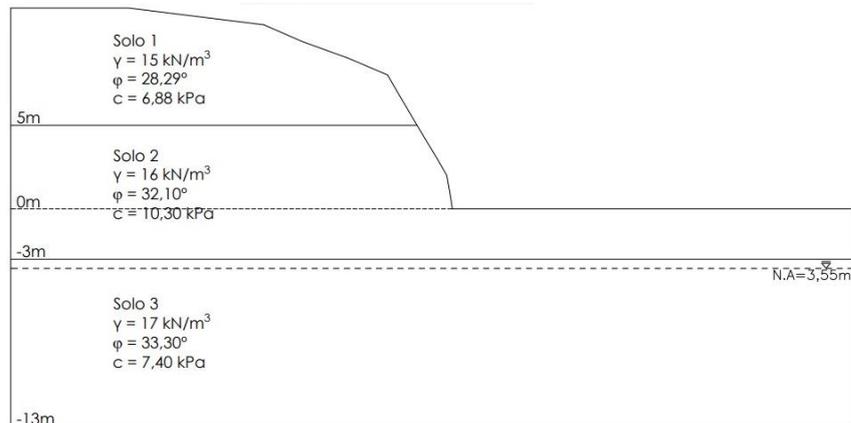
Fonte: Autoras (2022).

Figura 11 – Representação do solo na seção de corte AA.



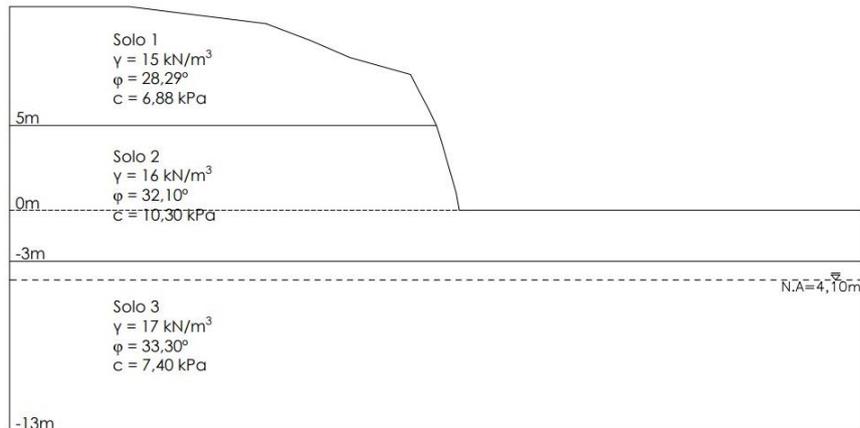
Fonte: Autoras (2022).

Figura 12 – Representação do solo na seção de corte BB.



Fonte: Autoras (2022).

Figura 13 - Representação do solo na seção de corte CC.



Fonte: Autoras (2022).

Segundo a NBR 11682 (ABNT, 2009), para analisar a estabilidade do talude devem ser feitas investigações preliminares do terreno, que visam: (i) determinar as características do local e o grau de segurança necessário; (ii) a conveniência de obra de estabilização, no caso de se tratar de terreno apresentando indícios de instabilidade, inclusive o diagnóstico preliminar desta; (iii) a conveniência de uma obra de reconfiguração local, no caso de corte de terreno estável; (iv) o planejamento das investigações das características intrínsecas do terreno; (v) e as investigações geotécnicas, geológicas, que abrangem levantamentos locais, coleta de dados, ensaios *in situ* e de laboratório e uso de instrumentação adequada para estabelecer um modelo geotécnico-geomorfológico.

São necessários estudos mais detalhados para conhecer as características do solo pois contribuem para um dimensionamento mais preciso das obras a serem realizadas. Os ensaios laboratoriais de caracterização mecânica dos solos constituem uma das componentes de grande relevância para a caracterização do comportamento tensão-deformação dos solos e deverá contemplar ensaios de campo, ensaios laboratoriais e observação do comportamento em escala real. A caracterização física é feita habitualmente recorrendo a ensaios de rotina simples como: análises granulométricas, determinação dos limites de consistência e do teor em água natural (nos solos finos), ensaios de compactação, determinação da massa volumétrica através de amostras representativas e determinação da densidade das partículas sólidas. Este conjunto de ensaios proporcionam a obtenção de parâmetros que identificam não só a natureza do solo, bem como podem ser correlacionados com as suas propriedades mecânicas.

### 3.2.3 Análise de estabilidade

O módulo SLOPE/W é um dos *softwares* mais modernos, reconhecidos e utilizados no mercado de aplicações voltadas para a análise de estabilidade de taludes, fundamentando-se em

análises de Equilíbrio Limite e suas formulações, que se baseiam, principalmente, no método das lamelas. Tais análises foram desenvolvidas ainda no início do século XX, e desde então vêm sendo usadas para avaliar estabilidade de taludes na engenharia geotécnica (MARANGON, 2017).

No *software* SLOPE/W foram introduzidas as geometrias das seções obtidas, e em seguida as regiões da encosta foram divididas em camadas, de acordo com os resultados do ensaio triaxial, nos quais foram atribuídos os materiais, de acordo com os tipos de solo e parâmetros geotécnicos que constituem cada camada. Em seguida uma linha piezométrica foi inserida na seção transversal analisada, de acordo com o nível de água presente no ensaio da respectiva seção.

Para avaliar a estabilidade do talude, o *software* permite escolher o tipo de análise utilizada. No caso, foram utilizados quatro métodos para avaliação da estabilidade do talude, sendo eles Morgenstern-Price, Spencer, Bishop e Fellenius.

Para definir as superfícies de pesquisa foi utilizado o método de entrada e saída, onde na entrada são delimitadas onde será a entrada do círculo no topo do talude e na saída são delimitadas onde será a saída do círculo no pé do talude. Esse método gera e analisa a estabilidade de superfícies de ruptura da seção estudada através do cálculo do equilíbrio de forças em cada fatia. A determinação do fator de segurança (FS) é feita por tentativas, ou seja, um processo iterativo, com uma série de círculos, com centros distintos, e onde cada círculo gera uma potencial superfície de ruptura, acompanhada de um fator de segurança.

### **3.2.4 Dimensionamento do solo grampeado**

#### **3.2.4.1 Grampos**

Para a realização do dimensionamento, os grampos adotados são constituídos por barras de aço de 25 milímetros de diâmetro de aço do tipo CA-50, com pintura anticorrosiva e furos de 100 milímetros de diâmetro. Para o comprimento do grampo (L), adotou-se a relação de  $0,8 \leq L/H \leq 1,2$ , recomendada por Clouterre (1991) para grampos perfurados, considerando H a metade da altura do talude. A altura do talude é de 9 metros. Sendo assim, de acordo com a Tabela 6, tem-se os resultados obtidos para o comprimento dos grampos.

A inclinação adotada em relação ao eixo horizontal é de  $15^\circ$  e os espaçamentos verticais entre os grampos que serão utilizados são de 1,8 metros, conforme recomendado pela NHI 14 007 (FHWA, 2015).

Tabela 6 - Relações de Clouterre (1991) para o comprimento dos grampos (L).

	Comprimento do grampo (L)(m)
	$H = 4,5m$
$0,8 \times H$	3,6
$0,9 \times H$	4,05
$1,0 \times H$	4,50
$1,1 \times H$	4,95
$1,2 \times H$	5,40

Fonte: Autoras (2022).

### 3.2.4.2 Resistência à tração do grampo

Para o cálculo da resistência característica estrutural à tração do grampo ( $R_{tk}$ ) e resistência a tração de cálculo do grampo foram utilizadas as equações 6 e 7. A Tabela 7 mostra os resultados obtidos.

Tabela 7 - Resultados obtida para resistência à tração dos grampos.

$f_{yk}$ (MPa)	$A_{útil}$ (m <sup>2</sup> )	$\gamma_m$	$R_{tk}$ (kN)	$R_{td}$ (kN)
500	4,91	1,15	245,4500	213,4348

Fonte: Autoras (2022).

### 3.2.4.3 Carga de Ensaio

Como recomendado pela NBR 16920 – 2 (ABNT, 2021), para o cálculo da carga máxima, foi utilizada a Equação 1, de acordo com a Tabela 8.

Tabela 8 - Resultado para a carga de ensaio máxima.

$f_{yk}$ (MPa)	$A_s$ (m <sup>2</sup> )	$\gamma_s$	$T_{último}$ (kN)
500	4,91	1,15	213,4348

Fonte: Autoras (2022).

A carga de ensaio deve ser prevista para o arrancamento do grampo e considerando que a carga máxima deve ser limitada à resistência de cálculo da barra de aço, conforme recomendado pela NBR16920 – 2 (ABNT, 2021) e de acordo com a equação 3 é possível determinar a carga de ensaio.

$$T_{ensaio} = T_{último} = 213,4340 \text{ kN}$$

Sabe-se que a carga máxima prevista ( $T_{ensaio}$ ) depende do comprimento do grampo, do diâmetro de perfuração do grampo e da resistência da interface solo-grampo e a única variável

desconhecida é a resistência, dessa forma de acordo com a equação 5 e para os diferentes tipos de grampos, obteve-se a tabela 9.

Tabela 9 – Resultado para o comprimento de grampo.

<b><math>L</math> (m)</b>	<b><math>q_s</math> (kN/m<sup>2</sup>)</b>
<b>3,60</b>	188,7278
<b>4,05</b>	167,7492
<b>4,50</b>	150,9742
<b>4,95</b>	137,2393
<b>5,40</b>	124,8119

Fonte: Autoras (2022).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Serão abordados nesse tópico os resultados obtidos com o emprego do *software* Slope/W, com objetivo de demonstrar e discutir a viabilidade da aplicação do solo grampeado na área estudada.

### 4.1 Verificação da estabilidade das seções

Foi determinado então, a partir das Tabelas 1, 2 e 3 o grau e o fator de segurança mínimo para que a seção fosse considerada estável. Como a área de estudo se trata de um local com intensa movimentação e/ou permanência de pessoas, e em uma área que afeta serviços essenciais por elevado período de tempo, a encosta é classificada de alto risco para vidas humanas e perdas materiais e ambientais, e, portanto, foi adotado FS mínimo de 1,5.

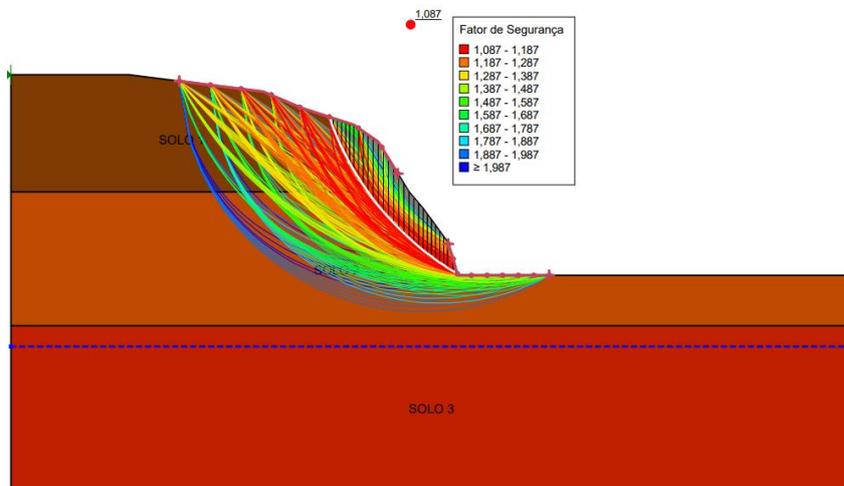
Foi utilizada a seção crítica para a determinação da instabilidade, sendo a seção crítica aquela que apresenta o menor fator de segurança entre as analisadas pelo programa. Assim, pôde-se concluir que nenhuma das seções para os métodos escolhidos obteve fator de segurança acima do mínimo (1,5), o que mostra que o talude está instável, podendo romper e colocar a vida de pessoas e edificações ao seu redor em risco. Dessa forma, fez-se necessária a utilização de métodos de estabilização.

#### 4.1.1 Seção AA

No corte AA, em todos os quatro métodos adotados o fator FS da seção crítica, ou seja, a mais frágil e com maior propensão a entrar em colapso, não atingiu o FS mínimo de 1,5.

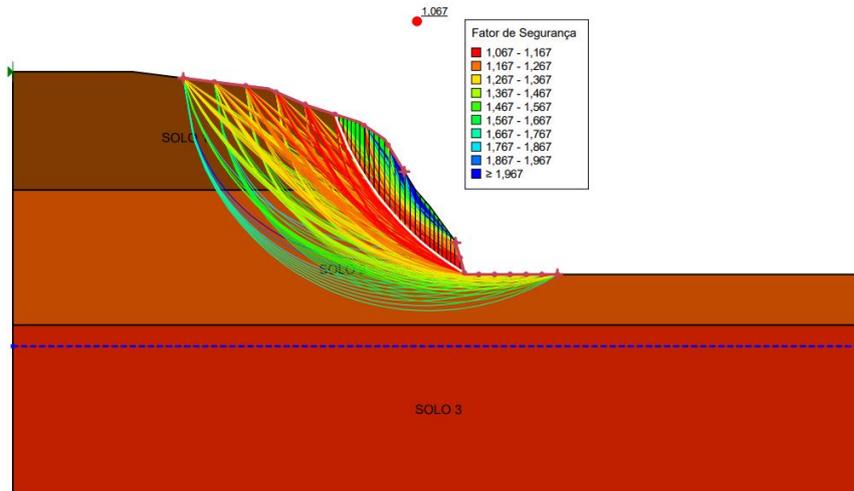
As Figuras 14, 15, 16 e 17 mostram as superfícies analisadas e uma faixa com os fatores de segurança referentes a cada uma delas.

Figura 14 - Fatores de segurança da seção AA: Método Bishop.



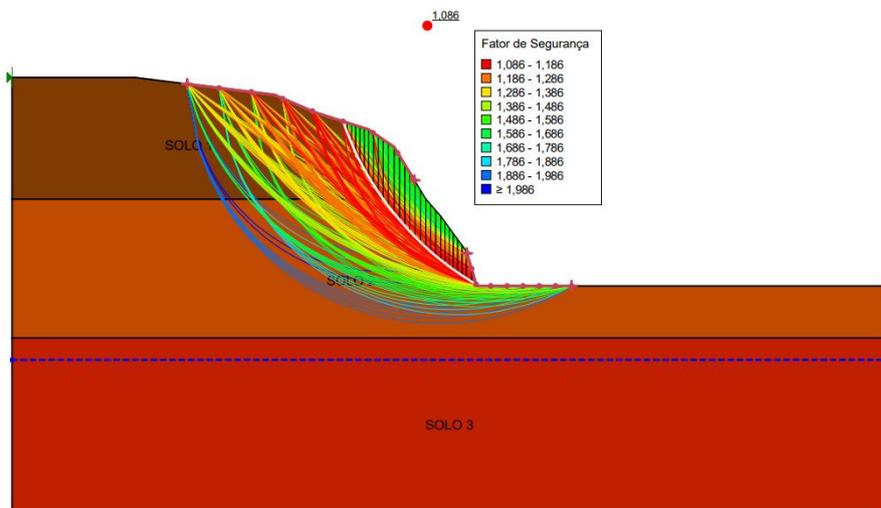
Fonte: Autoras (2022).

Figura 15 - Fatores de segurança da seção AA: Método Fellenius.



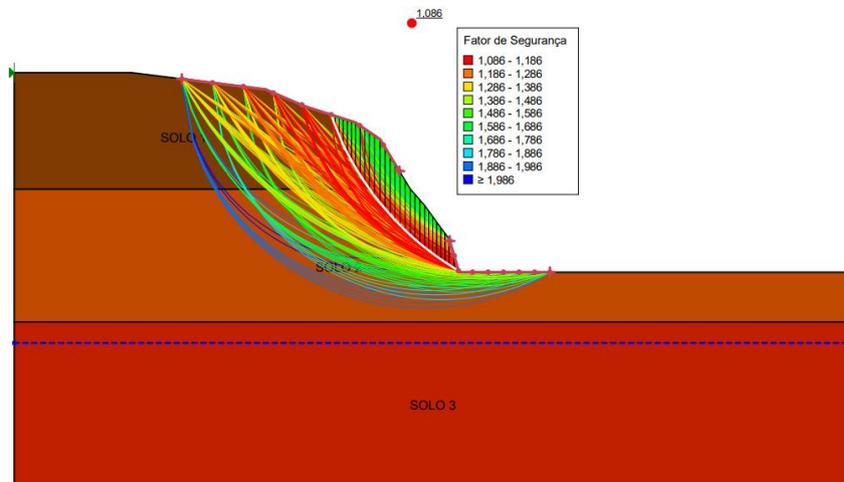
Fonte: Autoras (2022).

Figura 16 - Fatores de segurança da seção AA: Método Spencer.



Fonte: Autoras (2022).

Figura 17 - Fatores de segurança da seção AA: Método Morgenstern-Price.



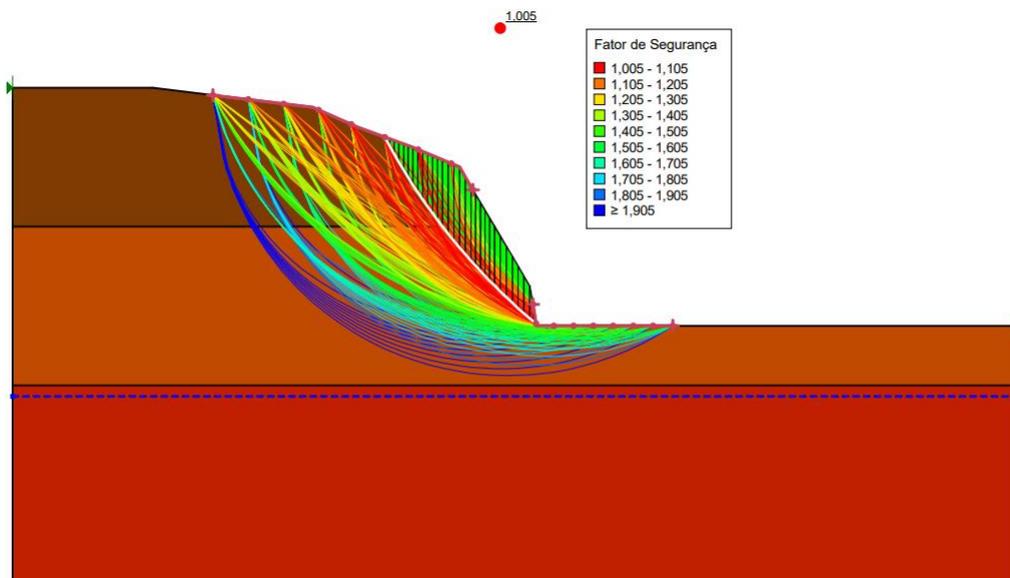
Fonte: Autoras (2022).

#### 4.1.2 Seção BB

No corte BB, os resultados se assemelham ao corte AA, onde o fator de segurança mínimo não foi atingido em nenhum dos métodos utilizados, e mostra que a seção também está em risco de entrar em colapso.

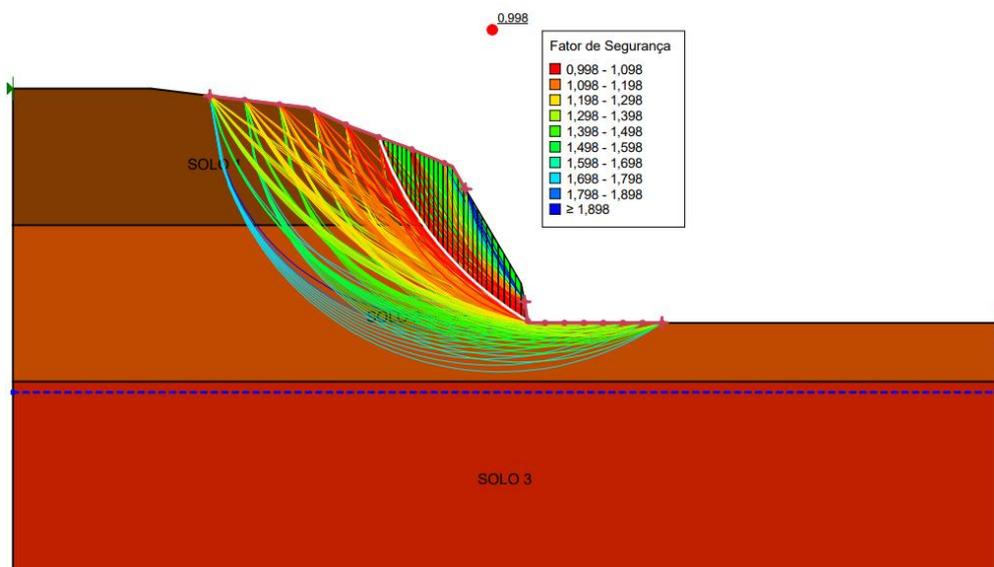
As Figuras 18, 19, 20 e 21 mostram as superfícies analisadas e uma faixa com os fatores de segurança referentes a cada uma delas.

Figura 18 - Fatores de segurança da seção BB: Método Bishop.



Fonte: Autoras (2022).

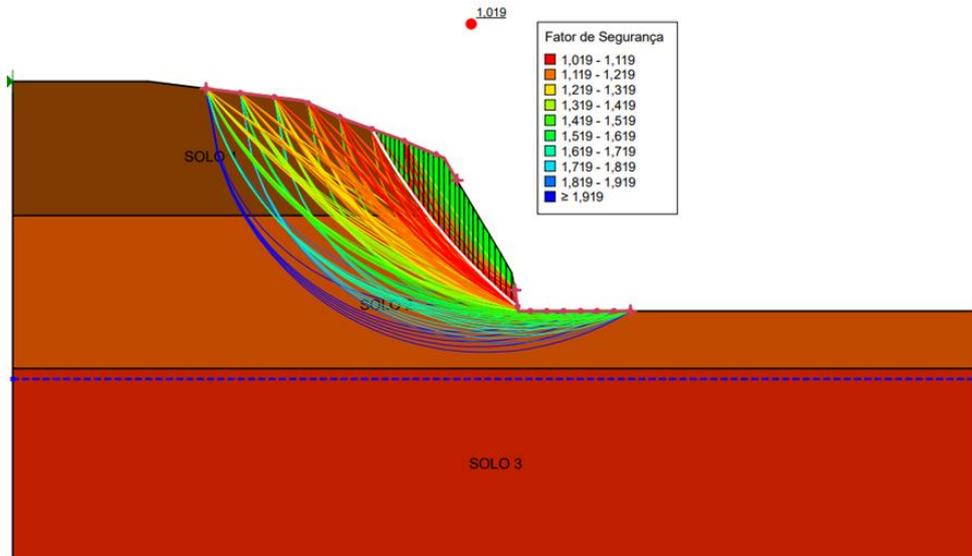
Figura 19 - Fatores de segurança da seção BB: Método Fellenius.



Fonte: Autoras (2022).

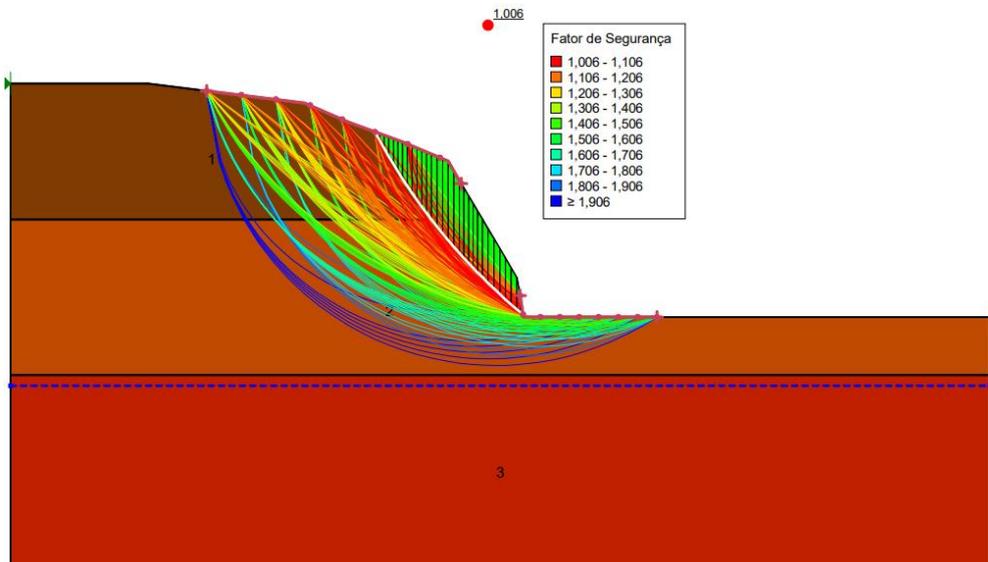
Assim como na AA', a seção de corte BB', também apresentou FS menor valor em relação aos outros métodos.

Figura 20 - Fatores de segurança da seção BB: Método Spencer.



Fonte: Autoras (2022).

Figura 21 - Fatores de segurança da seção BB: Método Morgenstern-Price.



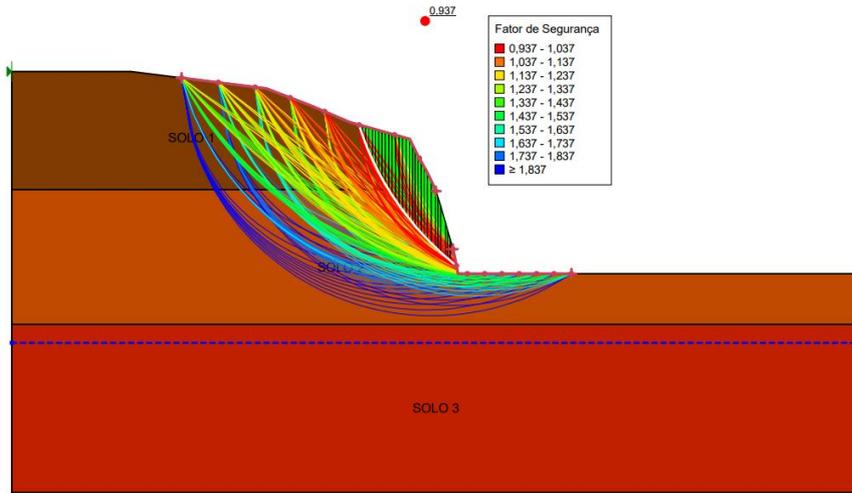
Fonte: Autoras (2022).

#### 4.1.3 Seção CC

De forma equivalente aos cortes AA e BB, o corte CC também se mostrou instável e suscetível a desmoronamentos, mostrando mais uma vez a instabilidade do maciço e a necessidade de estrutura de contenção.

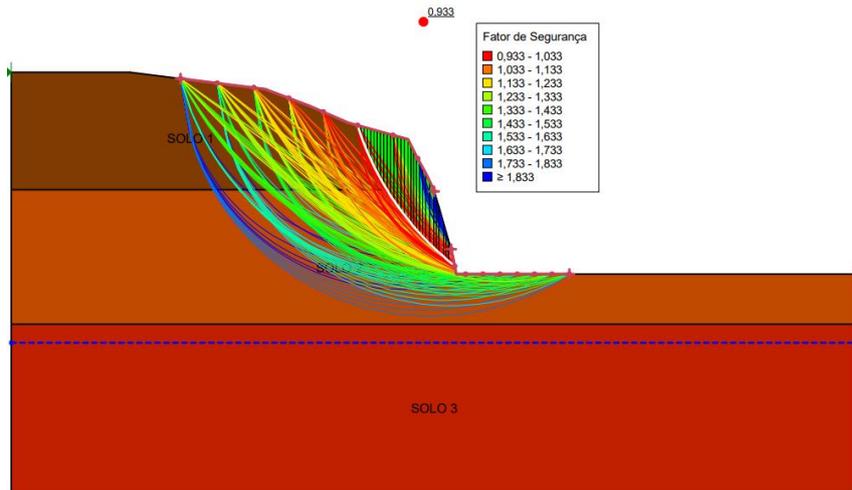
As figuras 22, 23, 24 e 25 exibem as superfícies analisadas e uma faixa com os fatores de segurança referentes a cada uma delas.

Figura 22 - Fatores de segurança da seção CC: Método Bishop.



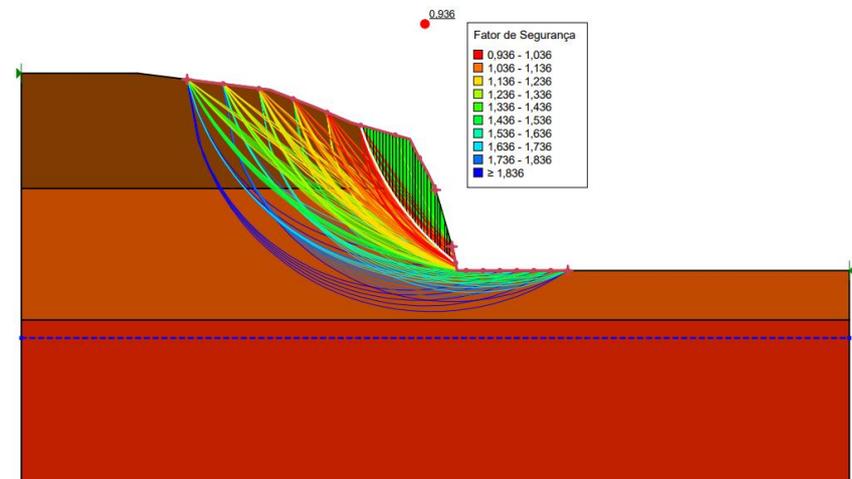
Fonte: Autoras (2022).

Figura 23 - Fatores de segurança da seção CC: Método Fellenius.



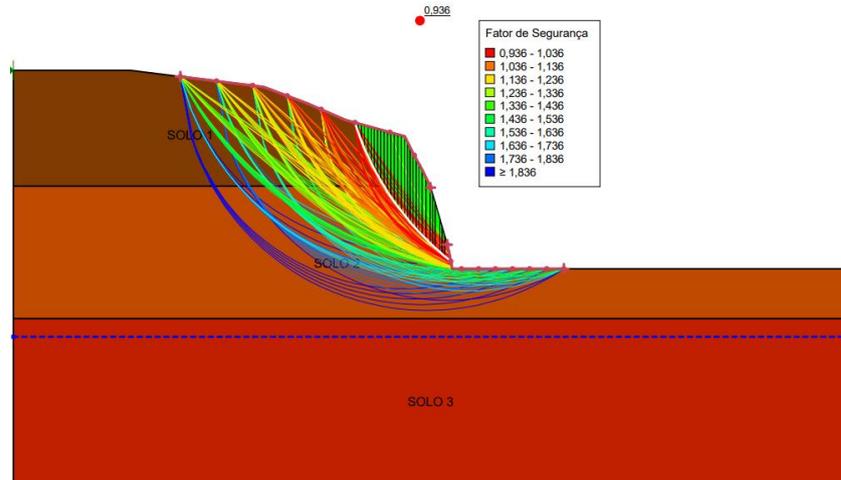
Fonte: Autoras (2022).

Figura 24 - Fatores de segurança da seção CC: Método Spencer.



Fonte: Autoras (2022).

Figura 25 - Fatores de segurança da seção CC: Método Morgenstern-Price.



Fonte: Autoras (2022).

#### 4.1.4 Análise dos resultados

No Slope/W, foi calculado o FS para cada seção empregando quatro diferentes métodos de estabilidade, conforme mostra a Tabela 10.

Tabela 10 - Resultados para o fator de segurança do talude natural.

Método	Seção AA	Seção BB	Seção CC
<b>Bishop</b>	1,087	1,005	0,937
<b>Fellenius</b>	1,067	0,998	0,933
<b>Spencer</b>	1,086	1,019	0,936
<b>Morgenstern-Price</b>	1,086	1,006	0,936
<b>Média</b>	1,082	1,007	0,936

Fonte: Autoras (2022).

Conforme a Tabela 10, nota-se que corte CC' apresentou a menor média em seus fatores segurança, seguido pelos cortes BB' e CC'. Comparando os resultados, foi possível concluir que apesar de diferentes, se encontram em mesma grandeza, o que mostra que as diferenças não são tão significativas entre os métodos de análise.

Porém, apesar de apresentarem resultados similares, o método de Fellenius, por ser um método mais simples, menos rigoroso e mais conservador, costuma apresentar menores fatores de segurança. Já no que diz respeito aos métodos de Spencer e Morgenstern-price, métodos mais rigorosos, os resultados encontrados se apresentaram de acordo com o esperado, pois são métodos mais minuciosos (satisfazem todas as equações de equilíbrio), apresentando valores um pouco mais elevados em comparação aos outros métodos.

Foi possível perceber também que em alguns casos o fator de segurança encontrado foi inferior a 1. Sabe-se que o FS é obtido por meio da razão entre as forças resistentes e as forças solicitantes, e esses resultados mostram que as forças solicitantes são superiores as resistentes e dessa forma a encosta já poderia ter entrado em colapso, de acordo com a teoria do equilíbrio limite. Como um FS inferior a unidade não tem significado físico, os resultados apresentados indicam uma incompatibilidade entre os dados adotados para os solos e a geometria da encosta, visto que os parâmetros geotécnicos utilizados não correspondem a área de estudo; o que pode estar levando a obtenção de baixos valores de fatores de segurança.

## 4.2 Inserção dos grampos no solo

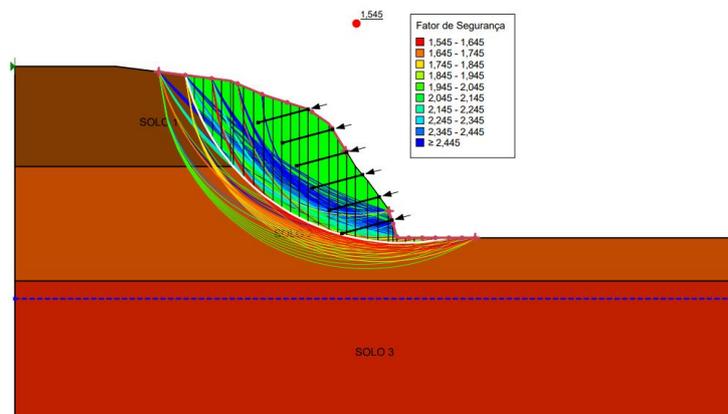
Após verificada a necessidade de contenção da encosta estudada, os grampos foram inseridos e os resultados analisados.

Foram estudados possíveis comprimentos e números de grampos a serem inseridos nas seções, de forma a atingir o fator de segurança mínimo e ser uma solução exequível, os comprimentos testados foram definidos com base na relação de Clouterre (1991), descrita anteriormente. Para cada seção e método, foram avaliadas as seções críticas, e a partir dessa análise, a quantidade e o comprimento dos grampos foi analisada de forma a atender a superfície de pesquisa com o menor fator de segurança.

### 4.2.1 Seção AA

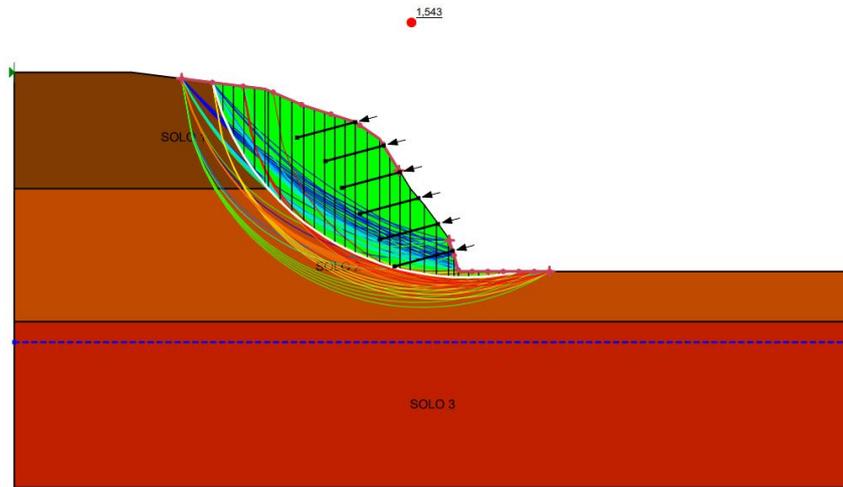
No corte AA, empregando os métodos de Bishop, Spencer e Morgenstern-Price a estabilidade do talude foi alcançada com seis grampos de 3,60m, enquanto pelo método de Fellenius, foi necessário a inserção de sete grampos de 4,50m de comprimento. Com isso, foi possível atingir o FS acima do valor mínimo de 1,5. Esses resultados estão demonstrados nas Figuras 26, 27, 28 e 29.

Figura 26 - Inserção dos grampos da seção AA: Método Bishop.



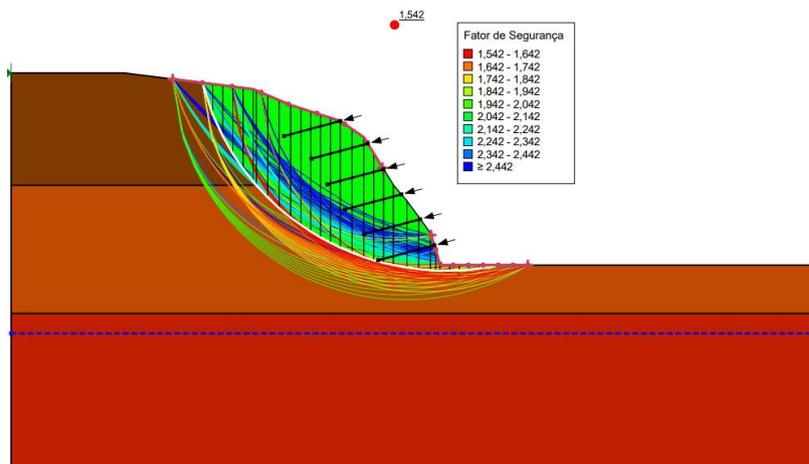
Fonte: Autoras (2022).

Figura 27 - Inserção dos grampos da seção AA: Método de Spencer.



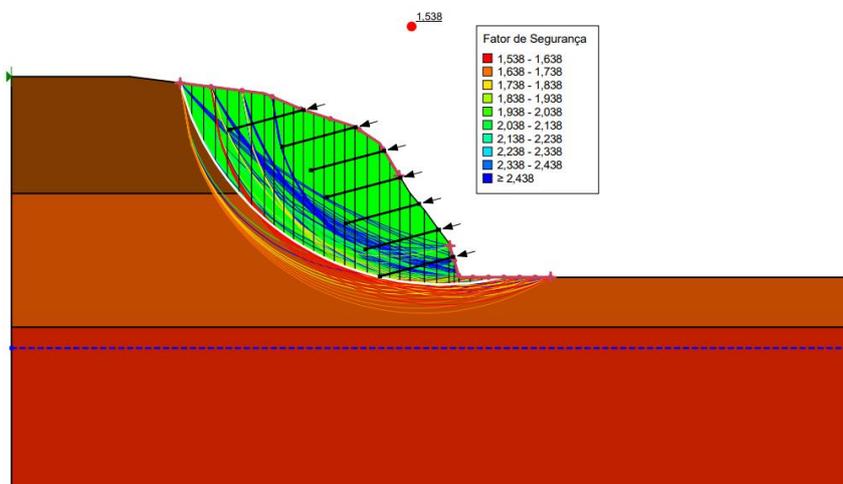
Fonte: Autoras (2022).

Figura 28 - Inserção dos grampos da seção AA: Método de Morgenstern-Price.



Fonte: Autoras (2022).

Figura 29 - Inserção dos grampos da seção AA: Método de Fellenius.

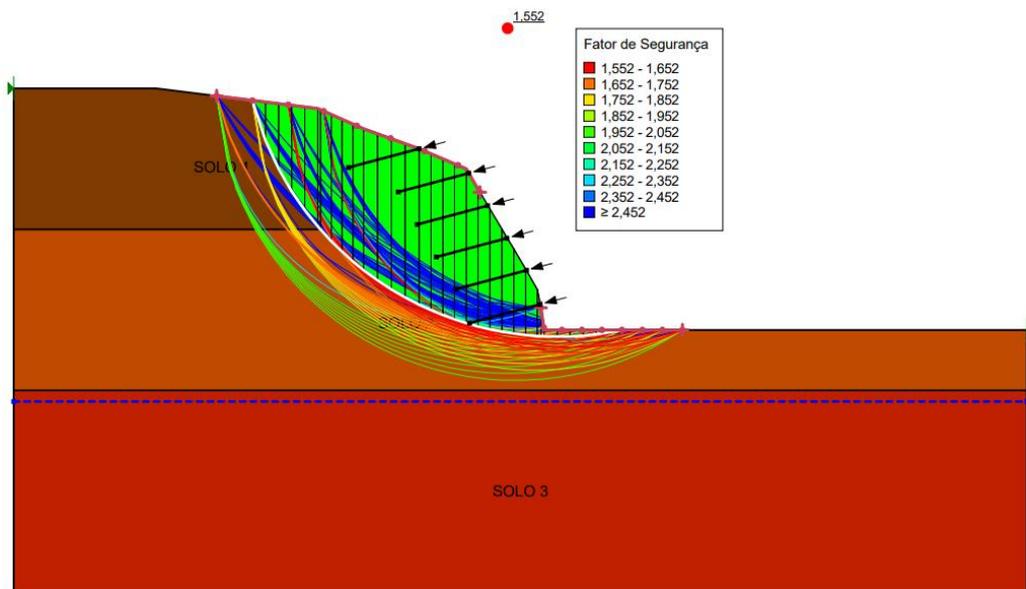


Fonte: Autoras (2022).

#### 4.2.2 Seção BB

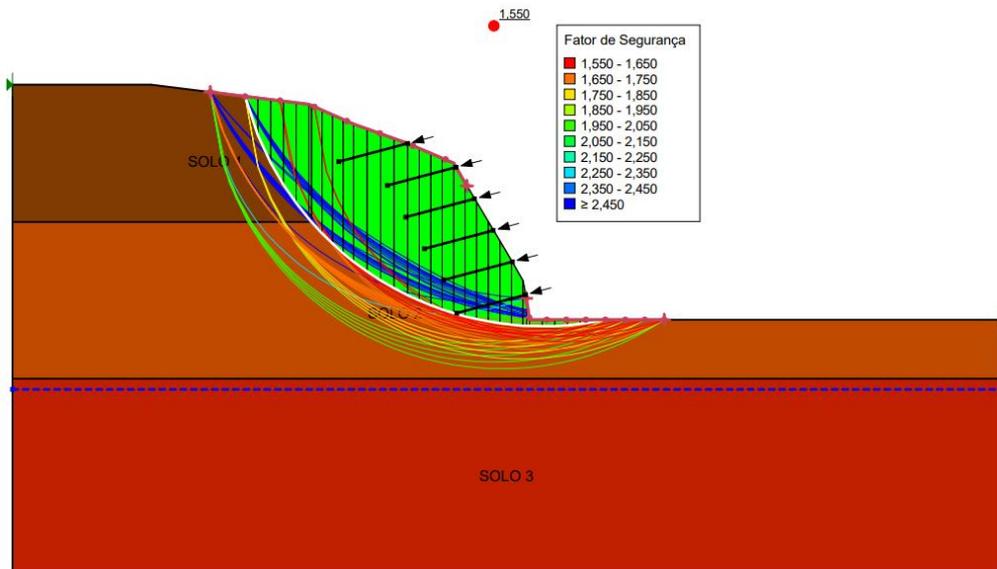
Paralelamente, no corte BB os grampos foram inseridos da mesma forma, nos métodos de Bishop, Spencer e Morgenstern-Price a estabilidade do talude foi alcançada com seis grampos de 3,60m, enquanto pelo método de Fellenius, novamente foi necessário a inserção de sete grampos de 4,50m de comprimento. Com isso, os fatores de segurança ficaram dentro do limite mínimo de 1,5. Esses resultados estão demonstrados nas Figuras 30, 31, 32 e 33.

Figura 30 - Inserção dos grampos da seção BB: Método Bishop.



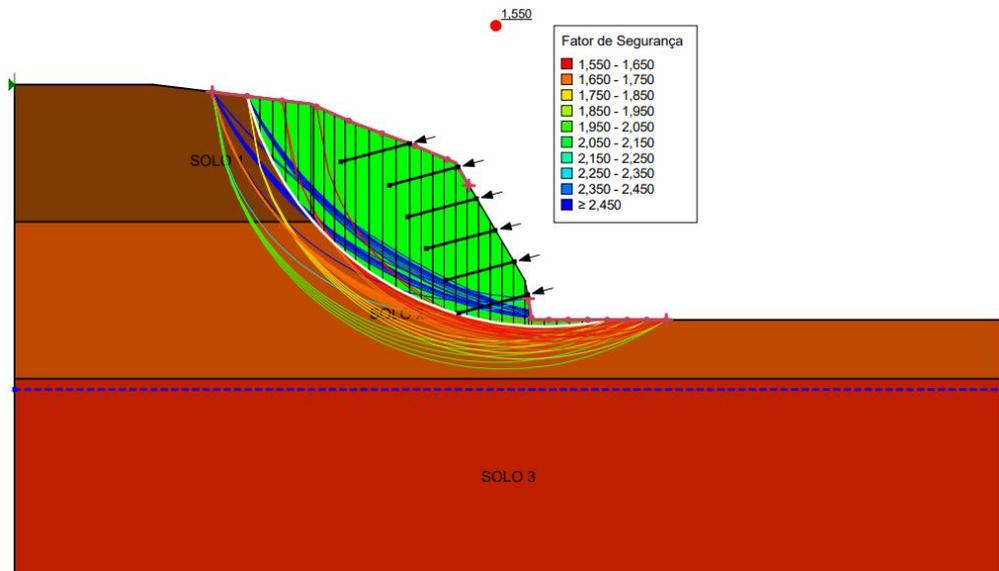
Fonte: Autoras (2022).

Figura 31 - Inserção dos grampos da seção BB: Método de Spencer.



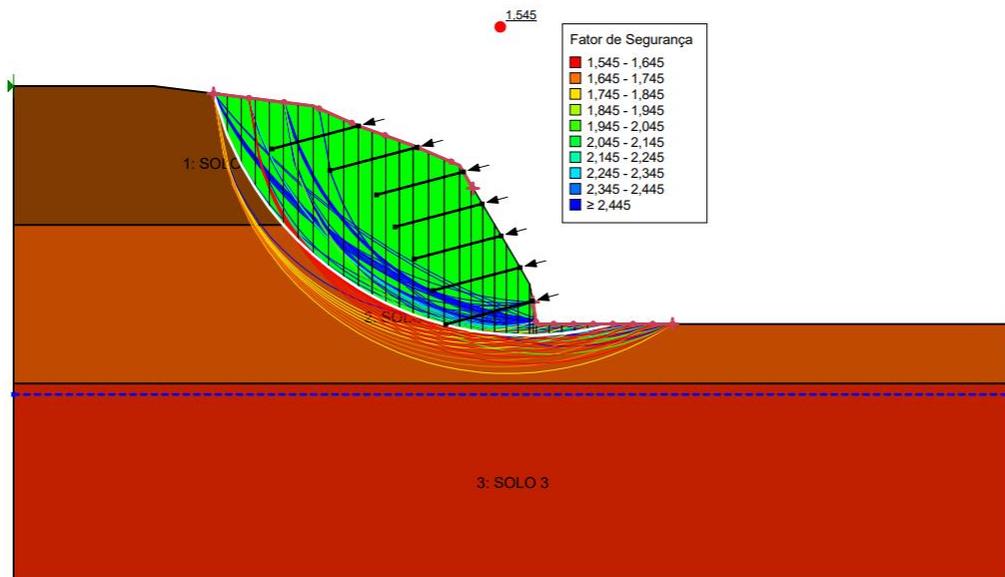
Fonte: Autoras (2022).

Figura 32 - Inserção dos grampos da seção BB: Método de Morgenstern-Price.



Fonte: Autoras (2022).

Figura 33 - Inserção dos grampos da seção BB: Método de Fellenius.

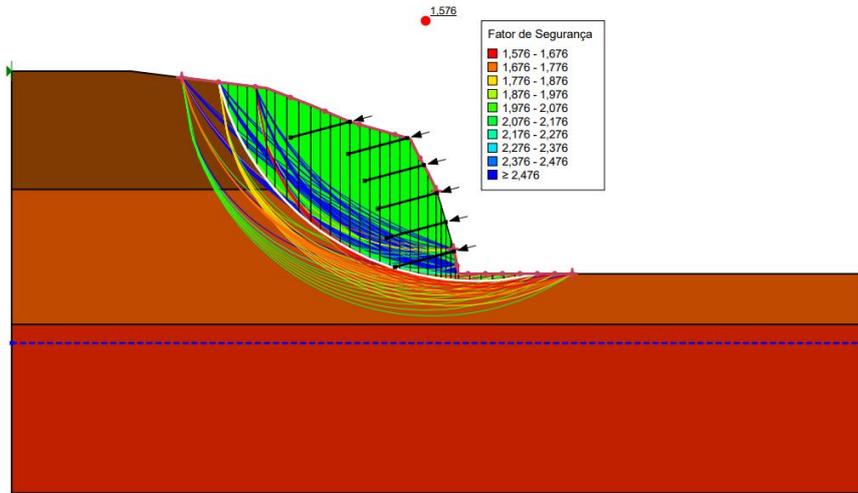


Fonte: Autoras (2022).

### 4.2.3 Seção CC

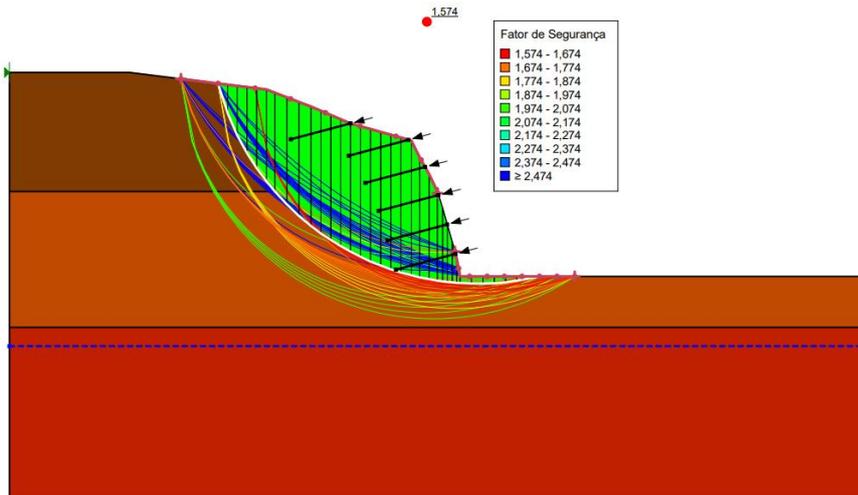
Assim como no corte CC, os resultados encontrados se aproximaram com os das outras seções, e por isso, os grampos foram inseridos da mesma forma, sendo nos métodos de Bishop, Spencer e Morgenstern-Price empregado seis grampos de 3,60m, enquanto pelo método de Fellenius, novamente foi necessário a inserção de sete grampos de 4,50m de comprimento. Com isso, os fatores de segurança ficaram dentro do limite mínimo de 1,5. Esses resultados estão demonstrados nas Figuras 34, 35, 36 e 37.

Figura 34 - Inserção dos grampos da seção CC: Método Bishop.



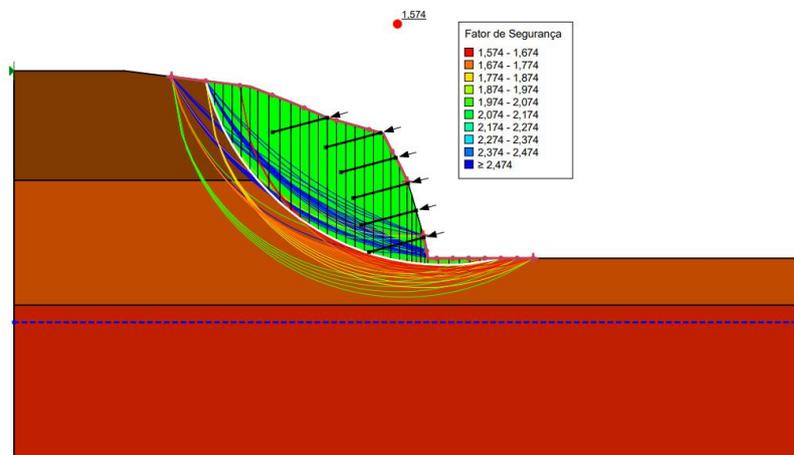
Fonte: Autoras (2022).

Figura 35 - Inserção dos grampos da seção CC: Método de Spencer.



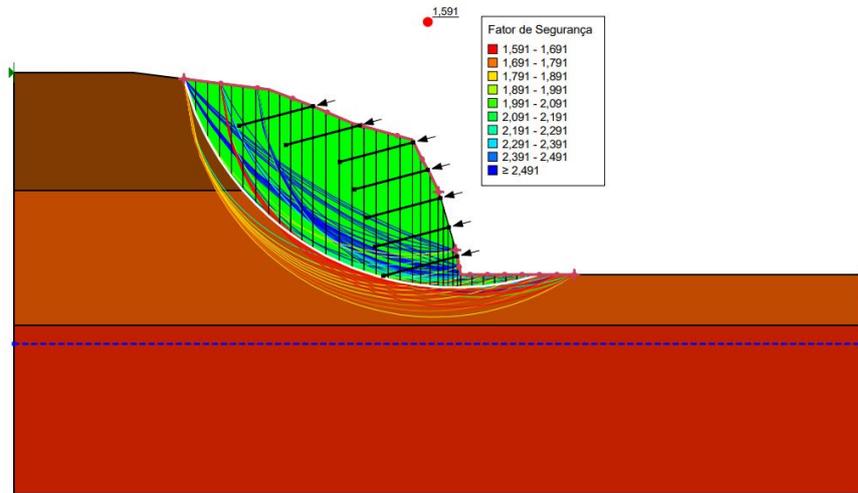
Fonte: Autoras (2022).

Figura 36 - Inserção dos grampos da seção CC: Método de Morgenstern-Price.



Fonte: Autoras (2022).

Figura 37 - Inserção dos grampos da seção CC: Método de Fellenius.



Fonte: Autoras (2022).

#### 4.2.4 Análise dos resultados

Uma síntese dos resultados alcançados para o FS das seções após as inserções dos grampos é mostrada na Tabela 11.

Tabela 11 - Resultados obtidos para FS após a inserção dos grampos.

	Seção AA		Seção BB		Seção CC	
	6	7	6	7	6	7
<b>Nº de Grampos</b>	6	7	6	7	6	7
<b>Comp. dos grampos (m)</b>	3,60	4,50	3,60	4,50	3,60	4,50
Bishop	1,545	-	1,552	-	1,576	-
Fellenius	-	1,538	-	1,545	-	1,591
Spencer	1,543	-	1,550	-	1,574	-
Morgenstern-Price	1,542	-	1,550	-	1,574	-

Fonte: Autoras (2022).

De acordo com Paiva (2021), quanto maior o espaçamento entre os grampos menor o fator de segurança alcançado após a introdução dos grampos e esse resultado se dá, pois, a intensidade das forças resistentes a cada metro de talude é menor e a sobreposição da região de influência dos grampos diminui, assim, a definição do espaçamento e consequentemente da quantidade de grampos tem influência direta no fator de segurança atingido pela seção após os grampos e em dimensionamento de projeto. Isso é confirmado nos resultados obtidos para FS em diferentes espaçamentos e número de grampos, como mostra a Tabela 11.

A quantidade e comprimento dos grampos foi definida de acordo com a necessidade de cada seção e em todas as seções, para o método de Fellenius, o fator de segurança mínimo não

foi atingido com apenas seis grampos de 3,60 metros de comprimento, dessa forma, foi estipulado um maior número de grampos com menores espaçamentos, a fim de aumentar as forças resistentes no talude e aumentar o fator de segurança.

Ainda pela Tabela 8 pôde-se inferir que os métodos considerados rigorosos (Spencer e Morgenstern-price) apresentam resultados muito parecido ou iguais, e esses métodos são conhecidos por apresentarem resultados mais fidedignos e serem a favor da segurança.

Em todos os casos analisados a seção crítica antes e após a inserção dos grampos é diferente, isso mostra que o fator de segurança alcançado na superfície crítica inicial passou a ser superior, fazendo com que ela deixasse de se apresentar como crítica. Como consequência disso, os grampos inseridos não atravessam toda a superfície crítica final, mas isso não influencia na estabilidade do talude, que continua apresentando FS superior a 1,5.

## 5 CONCLUSÃO

### 5.1 Conclusões

Neste trabalho foi feito um estudo sobre estabilidade e aplicabilidade da técnica de solo grampeado para uma encosta de estudo, além da comparação entre os métodos de análise de estabilização de taludes, Bishop, Fellenius, Spencer e Morgenstern-Price.

Por meio do software Slope/W, da empresa GeoStudio, em versão para teste, os conhecimentos adquiridos foram colocados em prática para a análise e estabilização de um talude localizado em um município no interior de Minas Gerais (MG), no qual foram utilizados parâmetros geotécnicos não condizentes com a realidade do campo, tendo em vista a impossibilidade de realização de ensaios de campo e laboratório. Após verificada a necessidade de contenção e estabilização da encosta, o mesmo software foi utilizado para análise da estabilização por meio da inserção de grampos, com parâmetros previamente calculados.

Mediante análise dos resultados extraídos do *software*, a encosta atingiu a estabilidade após a inserção dos grampos, ou seja, o fator de segurança da superfície de pesquisa crítica para cada seção analisada foi superior a mínimo de 1,5, como era esperado, visto que a técnica de solo grampeado é comprovadamente eficiente para estabilização de talude.

Os resultados mostraram que o espaçamento e comprimento dos grampos tem influência direta no fator de segurança final do talude. É importante ressaltar como os métodos mais rigorosos se mostram em relação a métodos menos rigorosos, como justificado ao longo desse trabalho, e que a confiabilidade é maior nos métodos rigorosos, como Spencer e Morgenstern-Price. Mas que mesmo assim, os resultados encontrados se apresentaram em mesma grandeza e não muito discrepantes.

Visando alcançar uma solução que seja econômica, segura e viável, conclui-se que a utilização de 6 grampos com o comprimento de 3,6 metros é a melhor solução para a estabilização da encosta estudada, visto que apresenta um custo inferior em relação a outra solução, e ainda, em três dos métodos analisados o fator de segurança obtido apresenta-se superior a 1,5.

Tendo em vista que estruturas de contenções em meios urbanos apresentam diversos problemas, tais como falta de espaço, técnicas construtivas ou até mesmo acessibilidade do local, pôde-se concluir também que o solo grampeado é uma solução viável para o caso explorado, visto que o talude se encontra em uma área densamente urbanizada e sem espaço para estruturas de contenções mais robustas ou até mesmo retaludamento. Diante disso, o solo grampeado é uma solução que evitaria desapropriações e grandes deslocamentos de terra, que elevariam muito o custo da obra.

## **5.2 Sugestões para trabalhos futuros**

Considerando que o solo grampeado foi uma solução exequível para o caso analisado, sugere-se para trabalhos futuros dimensionar o paramento aplicado na face do talude grampeado e os sistemas de drenagem mais apropriados para o contexto, visto que isso não foi o foco desse trabalho.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11682**: Estabilidade de encosta. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16920 – 2**: Muro e Taludes em solos reforçados parte 2: Solos grampeados. Rio de Janeiro, 2021.
- BARROS, P L. A. **Manual técnico: Obras de Contenção**. 6. ed. São Paulo: Maccaferri, 2013.
- BELONI, M.L. **Resistência ao arrancamento de grampos em solo residual de gnaiss**. 2010. Dissertação (Magister Scientiae em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.
- BRUCE, D. A.; JEWELL, R. A. **Soil Nailing: application and practice – part 1**. Ground Engineering, Londres, v. 19, n. 8, p. 10-15, nov. 1986.
- CLOUTERRE, **RECOMMENDATIONS CLOUTERRE. Soil nailing recommendations for designing, calculating, constructing and inspecting earth support systems using soil nailing** (English translation). 1991. Scientific Committee of the French National Project Clouterre, ENPC, Paris, France. In: Report FHWA-SA-93- 026, U.S.Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, DC, USA, July. Edited by F. Schlosser.
- EHRlich, M.; BECKER, L. **Muros e taludes de solo reforçado, projeto e execução**. Ed. Oficina, de Textos, 2009. 1º Reimpressão, 2011. São Paulo, 126p.
- EHRlich, M. **Solos Grampeados – Comportamento e procedimentos de análise**. In: ABMS/SIDUSCON. Grampeado Projeto, Execução, Instrumentação e Comportamento São Paulo, 2003. p. 27-138.
- FERREIRA, J. L. F. **Análise de estabilidade de taludes pelos métodos de Janbu e Spencer**. 2012. Dissertação (Mestre em geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2012.
- FIDELIS, D. C. G. F.; SILVA, T. F. A.; RIBEIRO, R. T. B.; LOUREIRO, S. L. O.; MARTINS, T. R. O. **Estabilização e contenção de encosta pelo método construtivo de cortina atirantada e solo grampeado verde: estudo de caso em obra de contenção em talude entre a Av. Raja Gabaglia e a Rua Flavita Bretas, em Belo Horizonte / MG**. Revista Paramétrica. Belo Horizonte, v. 13, n. 15, 16 p. 2021.

- FRANÇA, F. A. N. **Ensaio de arrancamento em solo grampeado executados em laboratório**. 2007. 123 p. Dissertação (Mestre em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- GÄSSLER, G. **In situ techniques of reinforced soil**. Proceedings of the International Reinforced Soil Conference. Performance of Reinforced Soil Structures. London: A. McGown, K. C. Yeo and K. Z. Andrawes. British Geotechnical Society, p.185-196, 1990.
- GERSCOVICH, D. M.S. et. al. **Estabilidade de Taludes**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Texto, 2016.
- GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1984.
- JURAN, I. et al. **Study of soil-bar interaction in the technique of soil nailing**. In: European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 8., 1983, Helsinque, Anais..., Helsinque: International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1983. p. 513-516.
- LAZARTE et al. Soil Nail Walls. **Reference Manual. Geotechnical Engineering** v. 7, n. FHWA-NHI-14-007. 425p. Washington, 2015.
- LAZARTE, C.A., ELIAS, V., ESPINOSSA, R.D., SABATINI, P.J. **Soil Nail Walls**, Geotechnical Engineering Circular No. 7, Report No. FHWA-IF-03-017, Federal Highway Administration, Washington, 2003.
- LANZIERI, R. D. **Avaliação de métodos de cálculos de solos grampeados por meio de modelagem tridimensional em elementos finitos e caso de obra**. 2019. Dissertação (Mestre em Ciências) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. 2019.
- LIMA, A. P. **Comportamento de uma escavação grampeada em solo residual de gnaise**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
- LIMA, J. M. F. **Interação Solo-Grampo: Comparação dos Resultados de Campo com Ensaio de Laboratório**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.
- MARANGON, M. **Utilização de recursos computacionais em geotecnia: Uso do programa SLOPE/W**, v. 4, 2017.
- MIRANDA, F. H. **Estudo da resistência ao cisalhamento na interface solo-grampo com o uso de calda aditivada e calda convencional**. 2019. Dissertação (Magister Scientiae em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2019.

- PAIVA, C. T. **Estudo de caso de estabilização de taludes em área urbana com estruturas mistas de solo grampeado e cortina atirantada**. 2021. Dissertação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021.
- PITTA, C. A.; SOUZA, G. J. T.; ZIRLIS, A. C. **Alguns detalhes da prática de execução de solo grampeado**. In: VI COBRAE – Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encosta, Angra dos Reis, RJ, 2013.
- RAJU, G. V. R.; WONG, I. H.; LOW, B. K. **Experimental nailed soil walls**. *Geotechnical Testing Journal*. v.20, n.1, p. 90-102, Mar. 1997.
- RANZINI, S. M. T.; NEGRO JR, A. **Obras de contenção: Tipos, métodos construtivos, dificuldades executivas**. In: VÁRIOS AUTORES. **Fundações: teoria e prática**. 2ª ed. São Paulo: Pini, 1998.
- SARÉ, A. R. **Comportamento de escavação grampeada instrumentada em solo residual**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
- SCHLOSSER, F. **Behaviour and design of soil nailing**. In: Symposium on Recent Developments in Ground Improvement Techniques, 1982, Bangkok. Anais..., Bangkok: Asian Institute of Technology, 1982. p. 399-413.
- SCHLOSSER; F.; DE BUHAN, P. **Theory and design related to the performance of reinforced soil structures**. In: International Reinforced Soil Conference Organized by the British Geotechnical Society, 1990, Londres. Anais..., Londres: British Geotechnical Society, 1990. p. 1-14.
- SHEAHAN, T.C.; ALVARADO, I. **A New Experimental Device for Determining Reinforcement Mechanisms in Soil Nails**. In: International Symposium on Earth Reinforcement, Proceedings, 1996.
- SILVA, D. P. **Análise de diferentes metodologias executivas de solo grampeado a partir de ensaios de arrancamento realizados em campo e laboratório**. 2009. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.
- SILVA, R. C. **Análise Do Comportamento De Estruturas De Solo Grampeado Através Da Monitoração De Obra E Modelos Físicos (Escala 1:1)**. 2010. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

- SPRINGER, F. O. **Estudos da deformabilidade de escavações com solo grampeado**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001. 108p.
- SPRINGER, F. O. **Ensaio de arrancamento de grampos em solo residual de gnaisse**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- SOLOTRAT ENGENHARIA GEOTÉCNICA. **Solo Grampeado**, São Paulo, 2020. Disponível em: <<https://www.solotrat.com.br/pdf/solo-grampeado-solotrat.pdf>>. Acesso em: 04 out. 2022.
- SOUZA, T. F. **Análise da eficiência do uso de grampos verticais em estruturas de solo grampeado**. 2019. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora. 2019.
- TEIXEIRA, I. J. R. **Estudo comparativo de duas alternativas para contenção de taludes verticais: solo grampeado e cortina atirantada**. 2011. Dissertação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Tecnologia, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2011.
- VILAR, O. M.; BUENO, B. S. **Mecânica dos Solos**. v. 2. Escola de Engenharia de São Carlos – Departamento de Geotecnia, São Carlos, 2004.
- VUCETIC, M.; TUFENKJIAN, M. R.; DOROUDIAN, M. **Dynamic centrifuge testing of soil nailed excavations**. *Geotechnical Testing Journal*, West Conshohocken. v 16, n. 2, p. 172-187, Jun 1993.
- ZIRLIS, A.C.; PITTA, C.A.; SOUZA, G.J.T; OLIVEIRA, M. **Soil Nailing: Chumbamento de Solos, Experiência de uma Equipe na Aplicação do Método**. In: COBRAE – Conferência Brasileira de Encostas, vol. 1. Rio de Janeiro. 1992.