

**Universidade Federal de Uberlândia**  
**Campus Santa Mônica**

Faculdade de Engenharia Civil

Larissa Rosa de Souza

**ANÁLISE NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE TALUDES REFORÇADOS EM  
SOLO GRAMPEADO COM FACE VERDE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador:

Prof. Dr. Jean Rodrigo Garcia

UBERLÂNDIA

2021

## ANÁLISE NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE TALUDES REFORÇADOS EM SOLO GRAMPEADO COM FACE VERDE

Larissa Rosa de Souza<sup>1</sup>

Jean Rodrigo Garcia<sup>2</sup>

### RESUMO

A técnica de estabilização de talude artificial chamada solo grampeado é uma das técnicas que mais se destacam entre as estruturas de contenção devido a agilidade e versatilidade de execução e baixo custo em comparação a outras técnicas. A técnica consiste na inserção de elementos semirrígidos que funcionam de forma passiva, ou seja, é necessário que o maciço se desloque para que com a força de atrito mobilizada na interface entre o solo e o grampo aumente a estabilidade do talude. Em seu processo construtivo é necessário a execução de um paramento para ancorar a extremidade do grampo. O tipo de paramento mais comumente utilizado é o concreto projetado. Entretanto, devido ao impacto ambiental e econômico, outras soluções têm sido consideradas para aplicações pontuais ou em faixas deste concreto, também chamados de *pads*. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi analisar o comportamento de um talude com 9 metros de altura sob o aspecto da estabilidade e do deslocamento a partir do método dos elementos finitos (MEF), considerando a inclusão de reforços do tipo grampo injetado, com paramento em faixas deste concreto projetado. A partir dos resultados das análises realizadas, verificou-se que não houve um aumento significativo do fator de segurança (SRF crítico), quando se comparou a solução em solo grampeado com faixas localizadas de concreto projetado (*pads*) ou sem paramento. Por outro lado, os deslocamentos horizontais e verticais encontrados estão compreendidos no intervalo preconizado pela literatura internacional, ou seja, entre 2H/1000 (18 mm) e 4H/1000 (36 mm).

**Palavras-chave:** Solo grampeado, *Pads* de concreto, Deslocamento, Estabilidade

---

<sup>1</sup> Graduanda em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Uberlândia. E-mail: larissarosa.empresaria@gmail.com

<sup>2</sup> Professor da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia. E-mail: jean.garcia@ufu.br

## 1 INTRODUÇÃO

A técnica de solo grampeado teve origem na técnica de execução de suportes de galerias e túneis aplicada na engenharia de minas. Entretanto, com o avanço no estudo, conclui-se que ela também era bastante eficaz em relação ao reforço do solo *in situ* em encostas ou taludes oriundos do processo de escavação.

O solo grampeado destaca-se entre as estruturas de contenção devido a agilidade de execução e baixo custo em comparação, por exemplo, cortina atirantada. A técnica consiste na introdução de elementos semirígidos resistentes a flexão composta, denominados grampos, que podem ser formados por barras de aço, barras sintéticas de seção cilíndrica ou retangular, microestacas, ou em casos especiais estacas. Os grampos são posicionados horizontalmente ou inclinados no maciço por processo de cravação (grampos cravados) ou injeção (grampos injetados) com o objetivo de introduzir esforços resistentes de tração e cisalhamento (ORTIGÃO *et. al.*, 1993).

Dentre as possibilidades de paramento do talude, destacam-se o faceamento por concreto projetado, os painéis ou blocos pré-moldados e as faces vegetadas, com ou sem geomanta. A função do revestimento inclui, além da proteção contra a erosão e as intemperes, a estabilização da face, sem que haja função estrutural significativa (RONDI, 2021).

A utilização deste método construtivo, através da ancoragem do topo (“cabeça”) dos grampos em *pads* de concreto armado, visa cumprir os requisitos ambientais, econômicos e de resistência pré-estabelecidos. As vantagens de se utilizar *pads* moldados *in situ* é a ligação efetiva do concreto com o solo, capaz de garantir resistência e contato direto para uma eficiência ideal (ALDER *et al.*, 2015). Esse efeito é garantido pois, o bloco de concreto armado proporciona uma reação aos grampos individuais para mobilizar as forças de tração e promover a estabilidade local entre os grampos do solo (OFFICE, 2017).

### 1.1 JUSTIFICATIVA

O solo grampeado é uma das técnicas de estabilidade de taludes mais utilizadas no Brasil devido ao baixo custo de instalação e rapidez na execução. Esse tipo de técnica é interessante sob o aspecto de ser acessível em locais de difícil acesso, pois são utilizados equipamentos de pequeno porte e em uma quantidade reduzida em relação as outras técnicas.

Em relação ao faceamento (paramento vertical ou inclinado) do talude reforçado em solo grampeado, a função desse revestimento inclui a proteção contra erosão, estabilização da face e ancoragem do grampo, sendo que o tipo mais utilizado é o concreto projetado. Entretanto,

a utilização desse tipo de revestimento vem sendo questionado em virtude das questões ambientais e econômicas ligadas ao menor consumo de materiais (concreto projetado, consumo de cimento). Por isso, novas formas de faceamento do talude vem sendo desenvolvidas e uma delas é o concreto projetado parcialmente localizado no topo dos grampos (“cabeça”), também chamados de *pad* de concreto, ou seja, faixa de concreto que ancora a cabeça do grampo na face do talude e no restante do talude é utilizado a vegetação como paramento. Essa nova forma tem indicado aspectos positivos devido a agilidade e a economia do processo.

## 1.2 OBJETIVO

Os objetivos deste trabalho foi o de analisar por meio do método dos elementos finitos a influência do emprego de reforço em solo grampeado, com e sem faixas de concreto projetado na face de um talude em condição precária de estabilidade. Além disso, avaliar a estabilidade deste talude, a partir do aumento da cobertura em concreto projetado, por meio da variação da espessura dos *pads*.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 SOLO GRAMPEADO

Solo grampeado é uma forma de estabilização realizada por meio da introdução de elementos resistentes, denominados grampos ou chumbadores (ORTIGÃO *et al.*, 1993). Segundo Springer (2006), para que o atrito na interface seja mobilizado é necessário que haja pequenos deslocamentos (de alguns milímetros) entre o grampo e o material do maciço. Esta é uma técnica realizada em três etapas básicas: escavação, introdução dos grampos ou chumbadores e o jateamento do concreto para a impermeabilização do maciço (MAGALHÃES, 2005). O principal elemento de interação dos grampos está relacionado à mobilização do atrito existente entre a superfície dos mesmos e o solo circundante e como as inclusões trabalham basicamente à tração, quanto maior o atrito entre os dois materiais, melhor será o desempenho do reforço (SPRINGER, 2006).

Um exemplo de talude reforçado com solo grampeado com face verde e os grampos estão sendo ancorados por *pads* de concreto (Figura 1).

Figura 1 – Exemplo de talude reforçado com solo grampeado com face verde



Fonte: GEO CONTENÇÕES,2021

### 2.1.1 Processo construtivo

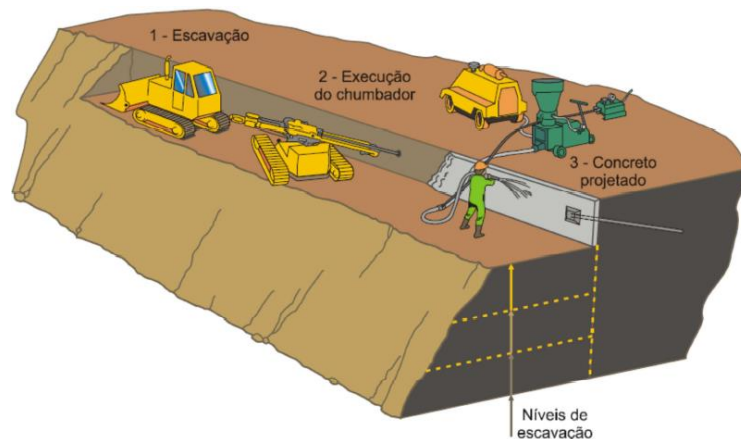
A técnica de solo grampeado com face verde segue o mesmo processo executivo do solo grampeado tradicional de inserção do grampo no maciço e da sequência de cima para baixo.

A construção de uma estrutura de solo grampeado pode ser feita em taludes naturais ou taludes resultantes do processo de escavação. Não se recomenda a aplicação da técnica em aterro, por questões construtivas (TEIXEIRA, 2011).

Em encostas naturais, ou em taludes onde já fora realizada a etapa de escavação, os grampos podem ser inseridos em linhas de cima para baixo, com a aplicação acompanhada da cobertura de argamassa ou concreto projetado, ou outro tipo de estabilização da face (TEIXEIRA, 2011).

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 chumbador e injetá-lo com calda de cimento e posteriormente aplicar o concreto projetado na face do talude remanescente (Figura 2).

Figura 2 – Principais etapas construtivas do solo grampeado.



Fonte: ZIRLIS *et al.*,1999 *apud* TEIXEIRA, 2011

### 2.1.1.1 Escavação

As recomendações usuais são de que se sejam feitas escavações com altura entre 1 e 2 m, mas isso depende do tipo de solo. Uma das recomendações usuais é de Gässler (1990) e os valores estão organizados na Tabela 1.

Tabela 1 – Altura das etapas de escavação

<b>Tipo de solo</b>	<b>Incremento de escavação</b>
Pedregulho	0,5 m – Com coesão aparente 1,5 m – Solo com cimentação
Areia	1,2 m – Medianamente compacta, com coesão aparente 1,5 m – Compacta, com coesão aparente 2,0 m – Com cimentação
Silte	1,2 m 2,0 m – Função do teor de umidade
Argila	1,5 m – Normalmente consolidada 2,5 m – Sobreadensada

Fonte: GÄSSLER, 1990 *apud* GONDIM, 2018

### 2.1.1.2 Introdução do grampo

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 utilizado água, ar ou lama. Se a opção for por trados, não é necessário o uso de fluidos (PIERK & AZEVEDO, 2009 *apud* TEIXEIRA, 2011). A inserção dos grampos no maciço pode ser feita por perfuração ou percussão, como já mencionado por Teixeira (2011).

As barras (chumbadores) são posicionadas no maciço após a execução dos furos, segue-se então, a injeção de nata de cimento para enchimento do furo, na relação água-cimento em torno de 0,5 em peso, ou de argamassa, em pressões baixas, inferiores a 100 kPa, por meio de tubo removido do furo após o processo de preenchimento (TEIXEIRA, 2011). A quantidade de tubos depende das fases de injeção previstas, e deve-se considerar um tubo para cada fase. Recomenda-se que não se faça a reinjeção, a não ser que haja dois ou mais tubos de injeção perdidos (LIMA, 2007).

### 2.1.1.3 Instalação dos drenos

A infiltração de água no interior do maciço reforçado pode gerar elevadas cargas hidrostáticas atrás do paramento da face e, conseqüentemente, provocar uma ruptura global do maciço. Além disso, pode contribuir para a redução dos parâmetros de resistência do solo e para o processo de corrosão das barras de aço, principalmente quando a água apresenta substâncias agressivas em sua composição. Para se evitar ou minimizar os efeitos da infiltração de águas superficiais no interior do maciço de solo, é extremamente importante a adoção de dispositivos de drenagem adequadamente dimensionados (PEREIRA, 2016).

Em obras de solo grampeado, é comum utilizar dois tipos de drenagem: drenagem horizontal/sub-horizontal profunda ou drenos rasos. A drenagem horizontal profunda é composta por tubos de PVC perfurados e envoltos por uma manta geotêxtil que visam captar a água no interior do maciço e reduzir a saturação. Já os drenos rasos são representados pelos barbacãs, drenos de paramento ou canaletas. Esse tipo de dreno, direciona a água superficial para os dissipadores de energia e minimizam os efeitos deletérios de potenciais mecanismos erosivos (PEREIRA, 2016).

### 2.1.1.4 Revestimento da face

O faceamento representa a proteção da face do talude quanto a eventuais processos erosivos e/ou instabilizações localizadas nas frentes da escavação (PEREIRA, 2016). Dentre as possibilidades de paramento do talude, destacam-se o faceamento por concreto projetado e as faces vegetadas, com ou sem geomanta (RONDI, 2021).

O revestimento em concreto projetado associado a armadura constituída de tela metálica, simples ou dupla, é, em geral, a solução mais empregada para o faceamento do solo grampeado (GEORIO, 2014). No entanto, devido a responsabilidade ambiental visando o menor consumo de recursos naturais, a utilização de vegetação como paramento do talude tem indicado aspectos positivos devido a agilidade e a economia do processo. Ademais, a aplicação de cobertura vegetal promove o aumento da resistência ao cisalhamento do solo devido ao reforço gerado pelas raízes (GREENWAY, 1987).

A utilização de um novo método construtivo, através da ancoragem da cabeça dos grampos em *pads* de concreto armado individuais, visa cumprir os requisitos ambientais, econômicos e de resistência pré-estabelecidos (RONDI, 2021). As vantagens de se utilizar *pads* moldados *in situ* é a ligação efetiva do concreto com o solo, capaz de garantir resistência e contato direto para uma eficiência ideal (ALDER *et al.*, 2015). Esse efeito é garantido pois, o

bloco de concreto armado proporciona uma reação aos grampos individuais para mobilizar as forças de tração e promover a estabilidade local entre os grampos do solo (OFFICE, 2017). Entretanto, há também os *pads* pré-moldados.

### 2.1.2 Grampos

Chumbadores ou grampos são peças moldadas no local por meio de operações de perfuração feitas com equipamento sobre carreta ou de porte manual, e instalação e fixação de armação metálica, com injeção de calda de cimento sob pressão (SOUZA, 2020).

Segundo Ribeiro (2015), o grampo tem a finalidade de distribuir cargas ao longo de todo o seu comprimento interagindo com o terreno circunvizinho, podendo parte da carga mobilizada ser absorvida pela cabeça.

Segundo Ortigão (1997 *apud* Lima, 2007), o desempenho do grampo quanto à resistência ao cisalhamento no contato solo-grampo, pode ser melhorado com os seguintes cuidados:

- Limpeza do furo: a limpeza do furo durante a perfuração pode ser realizada a seco (com ar comprimido) ou utilizando água ou outro fluido na lavagem (com equipamentos rotativos);
- Materiais e fator água-cimento: empregando componentes de calda de cimento com fator água-cimento adequados;
- Aditivos: um importante aditivo é o expansor de calda de cimento, que evita a retração e, conseqüentemente, a diminuição do atrito. Outro aditivo é o acelerador de pega, permitindo a mobilização do reforço em menor tempo;
- Tubo lateral de injeção: a utilização de uma tubulação plástica lateral de injeção deve ser prática obrigatória, especialmente em grampos longos com comprimento maior que 3m, pois é essencial garantir que a calda preencha todo o furo;
- Espaçadores e centralizadores: são dispositivos simples que podem ser fabricados na própria obra, instalados a cada 2 ou 3 m ao longo da barra de aço. Garantem que a barra seja centrada no furo.

Os grampos podem ser de dois tipos: injetados (*grouted nail*) ou cravados (*driven nail*). No primeiro caso, as perfurações são feitas por meio de máquinas perfuratrizes. Estas máquinas geralmente são leves, o que possibilita a execução da técnica em locais de difícil acesso. Já no caso dos grampos cravados, a cravação é feita por percussão com o auxílio de martelotes. Esse



tipo de execução permite que o processo de instalação do grampo seja mais rápido, porém, segundo Lima (2007), a resistência ao cisalhamento no contato solo-grampo sofre uma redução variando na ordem de 30 a 40 kPa.

Além disso, de acordo com Lima (2007), não é recomendado a utilização desse tipo de grampo quando há ocorrência de pedregulhos, nem no caso das argilas porosas, como as de São Paulo e de Brasília, onde a resistência mobilizada é reduzida. Há também outra limitação quanto ao comprimento máximo, que é da ordem de 6m, condicionado à eficiência de cravação do grampo (ORTIGÃO *et al.*, 1993).

### 2.1.3 Vantagens e desvantagens

A técnica de solo grampeado é muito utilizada em razão da gama de vantagens que ela oferece. Ela vem ganhando força com os projetistas e nas últimas três décadas vem sendo utilizada com maior frequência em território brasileiro (SARE, 2007 *apud* PEREIRA, 2018). Segue abaixo algumas das vantagens que a técnica oferece:

- Facilidade e velocidade na execução – os equipamentos utilizados são facilmente encontrados e são de fácil manuseio. Destaca-se também, a execução dos grampos, ela dispensa tempo de cura e a proteção de face com concreto projetado garante agilidade ao processo.
- Baixo custo – esta técnica apresenta custo mais baixo que as similares. Ela apresenta um uso reduzido de equipamentos, caracterizados ainda por serem equipamentos de pequeno porte. Além disso, a proteção do talude pode ser feita de várias formas e podem permitir uma considerável economia.
- Versatilidade – a técnica pode ser utilizada até mesmo em áreas sísmicas ou com cargas dinâmicas. Ela também permite uma solução conjunta com outros tipos de contenção.

Embora possua vantagens que são pontos muito fortes, esta técnica como todas as outras também possuem desvantagens que devem ser consideradas na fase de pré-projeto:

- Nível d'água – uma das limitações do método é a presença de água. Portanto, caso isso ocorra, deve ser previsto o rebaixamento do lençol freático para que possa ocorrer as escavações.
- Deslocamentos – devido ao princípio de funcionamento dos grampos (elementos passivos), deve-se tomar cuidado com os deslocamentos horizontais e verticais durante e após a execução. Portanto é importante o monitoramento desses

deslocamentos para que esses recalques não prejudiquem as edificações vizinhas.

- Solo adequado – o solo necessita de uma coesão mínima para se manter estável até que sejam instalados os grampos.

#### 2.1.4 Resistência ao cisalhamento de interface solo-grampo

O principal mecanismo de interação solo-grampo refere-se à mobilização do atrito existente entre a superfície do reforço e o solo (LIMA, 2002). Por meio dessa interação ocorre a transferência de esforços de tração dos grampos ao solo (MIRANDA, 2019).

A estabilidade de uma contenção em solo grampeado é analisada em seu estado limite último, portanto, a obtenção da resistência ao cisalhamento de interface solo-grampo  $q_s$  é essencial para o projeto de estruturas grampeadas (MIRANDA, 2019). A carga axial de tração,  $F_{arr}$ , nos grampos é introduzida como força estabilizante, que corresponde à resistência ao arrancamento mobilizada (SPRINGER, 2006).

A resistência  $q_s$  depende das características físicas da superfície do grampo (cravado ou injetado), do processo executivo (cravação, perfuração e injeção), do tipo, densidade e teor de umidade do solo. A sua verdadeira quantificação é obtida através de ensaios de arrancamento (prova de carga) executados em campo (SPRINGER, 2001). Pode-se estimar o valor de  $q_s$  para a fase de projeto por meio de correlações empíricas da literatura e pela metodologia segundo a ABNT NBR 5629 (ABNT, 2016). Entretanto, os ensaios *in loco* são essenciais para a real avaliação do atrito solo-grampo durante a construção (FEIJÓ, 2007).

Ortigão e Sayao (2004) propõem uma equação que correlaciona  $N_{SPT}$  e  $q_s$ , obtida a partir de amostras de ensaios de arrancamento. Estes ensaios ocorreram em São Paulo, Rio de Janeiro e Brasília, executados em furos com diâmetros entre 75 e 150 mm com injeção de calda de cimento sem pressão. Na Figura 3 estão os resultados dos ensaios de Ortigão e Sayao (2004).

Os valores de resistência ao arrancamento de cada camada de solo são determinados de acordo com a Equação 1. Já o valor admissível dessa resistência é obtido pela Equação 2. Por fim, resistência de aderência unitária (*Bond Strength*) é determinada pela Equação 3.

$$q_s = 67 + [60 \cdot \ln(N_{SPT})] \quad (1)$$

$$q_{s,adm} = \frac{q_s}{FS} \quad (2)$$

$$t = q_{s,adm} \cdot \pi \cdot D \quad (3)$$

Em que:

$N_{SPT}$ : número de golpes necessário à penetração de 30 cm do amostrador no solo;

$q_s$ : resistência de aderência em kPa;

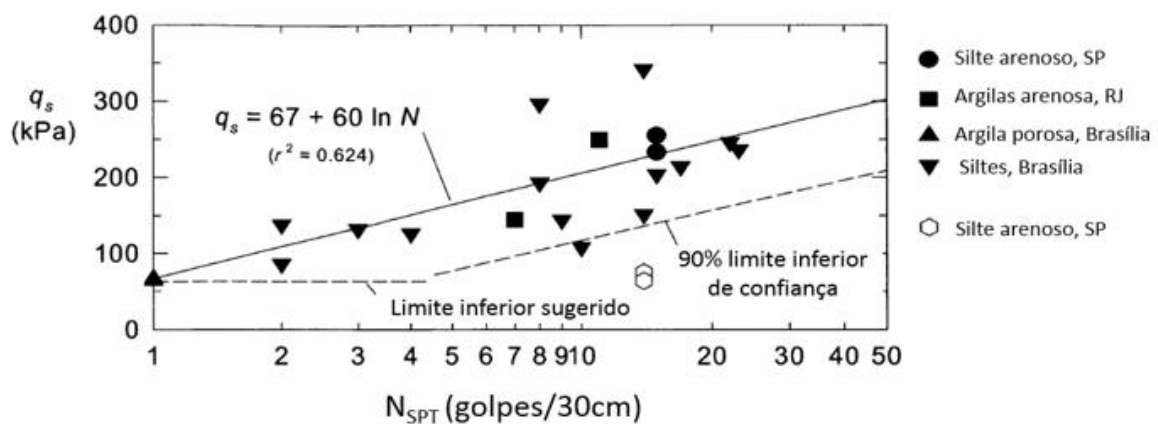
FS: fator de segurança adotado no cálculo (FS = 1,3);

$q_{s,adm}$ : resistência de aderência admissível em kPa;

D: diâmetro do furo do grampo em m;

t: força de aderência unitária em kN/m.

Figura 3 - Resultado de testes para resistência de aderência



Fonte: ORTIGÃO; SAYAO, 2004

### 2.1.5 Deslocamentos

Segundo Pereira (2016), os deslocamentos da face da estrutura em solo grampeado dependem de uma série de fatores, incluindo a geometria do talude, alturas das fases de escavação, espaçamentos entre os grampos, comprimento e inclinação dos grampos e capacidade de carga do solo de fundação. Além disso, como a escavação é realizada do topo em direção ao pé do talude, de acordo com Pereira (2016), as deformações tendem a ser maiores no topo da estrutura e isso induz a uma maior mobilização de esforços nos grampos mais próximos da superfície.

Segundo Clouterre (1991) há deslocamentos horizontais ( $\delta_h$ ) e verticais ( $\delta_v$ ) máximos admissíveis em uma estrutura de contenção em solo grampeado que depende do solo. As expressões para o cálculo dos valores estimados de deslocamentos estão organizadas na Tabela 2. Além dos deslocamentos, há também o coeficiente k (coeficiente de empuxo da terra) que também depende do tipo de solo.

Tabela 2 – Estimativa dos valores e da influência dos deslocamentos

	<b>Solos intermediários (rochas)</b>	<b>Solos arenosos</b>	<b>Solos argilosos</b>
$\delta_h = \delta_v$	H/1000	2H/1000	4H/1000
k	0,8	1,25	1,5

Fonte: CLOUTERRE, 1991

## 2.2 ESTABILIDADE

A análise de estabilidade de taludes visa mensurar o quão estável é uma encosta ou talude e desta forma identificar o risco de ocorrência de movimentos de massa. Para avaliar a estabilidade do maciço considera-se as propriedades geotécnicas e as influências externas como carregamentos, precipitação e ações humanas. Por fim o equilíbrio do talude é determinado pela relação entre as forças estabilizantes, oriundas do próprio solo e eventuais reforços, e forças desestabilizantes, provenientes de cargas na superfície, poropressão e do peso próprio do maciço (GERSCOVICH, 2016).

### 2.2.1 Redução de resistência ao cisalhamento (SSR)

Segundo Rocscience (2021), esse método permite a análise de estabilidade de inclinação do talude por meio de elementos finitos e calcula um fator de redução de resistência crítica para o modelo. O fator crítico de redução de resistência é equivalente ao "fator de segurança" da condição do talude.

De acordo com Rocscience (2021), o conceito básico do método é encontrar um valor para o fator de segurança por meio de repetições. O software impõe valores diferente de SRF (*Shear Reduction Factor*) até que o modelo se torne instável, ou seja, os resultados da análise não convergem ou as deformações sejam inaceitavelmente grandes.

Hammah (2005) explica que no método SSR (*Shear Strength Reduction*) é comumente utilizado o modelo de resistência de Mohr-Coulomb para os materiais, pois, com esse critério, os resultados podem ser expressos em termos de tensões principais ou tensões de cisalhamento e normais (o que torna adequado para o uso de análises de elementos finitos e de equilíbrio-limite).

Segundo Rocscience (2021), a especificação deste modelo e seu critério de escoamento normalmente envolve a hipótese de Coulomb conforme a Equação 4 em que  $\tau$  é a resistência ao cisalhamento,  $\sigma_n$  é a tensão normal,  $\phi$  é o ângulo de atrito e  $c$  é a coesão.

$$\tau = c - \sigma_n \cdot \tan \phi \quad (4)$$

Além disso, o modelo Mohr-Coulomb no RS2 e RS3 é um modelo de material elasto-frágil-plástico em geral. Na análise de estabilidade de taludes usando o Método dos Elementos Finitos com Redução da Resistência ao Cisalhamento, o fator a resistência ao cisalhamento pode ser calculado aplicando o fator de redução de resistência à resistência ao cisalhamento definida pela Equação 5 e as propriedades de Mohr-Coulomb fatoradas após a aplicação do SRF são expressas pelas Equações 6 e 7.

$$\frac{\tau}{SRF} = \frac{c - \sigma_n \cdot \tan \varphi}{SRF} \quad (5)$$

$$C_{SRF} = \frac{c}{SRF} \quad (6)$$

$$\varphi_{SRF} = a \tan \left( \frac{\tan \phi}{SRF} \right) \quad (7)$$

### 2.2.2 Os grampos

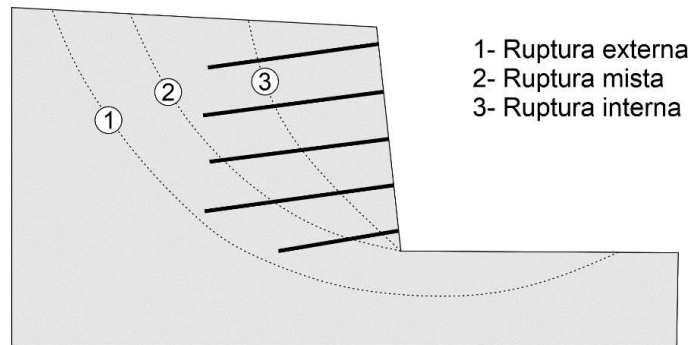
O software RS2, possui diversos tipos de ancoragens e formas diferentes de consideração da aderência entre solo e calda injetada. Após uma análise prévia entre duas possibilidades entre *Tieback* e *Fully Bonded*, optou-se pelo tipo de ancoragem (*bolt*) denominada *fully bonded* para representar o grampo injetado com barra de aço inserida. Neste tipo de ancoragem é necessário decidir preliminarmente qual será a resistência de aderência unitária a ser informada como parâmetro de entrada. O critério de decisão é adotar o menor valor entre essas duas resistências calculadas.

### 2.2.3 Superfícies de ruptura

O sistema em solo grampeado pode ser subdividido em duas zonas sendo: zona ativa localiza-se imediatamente atrás da face do muro, na região instável onde o solo é suportado pelos grampos e paramento. Na zona ativa o solo tende a se movimentar para fora da estrutura, gerando tensões que são resistidas pelo reforço. Já a zona passiva trata-se da parte resistente, é a região na qual as forças de atrito resistem ao movimento do reforço, pois sua direção é para o interior do maciço.

Existem diversos tipos de superfície potencial de ruptura, tais como locais (internas), globais (externas) e mistas (Figura 4).

Figura 4 – Tipos de superfície de ruptura para taludes inclinados



Fonte: CLOUTERRE, 1991

A ruptura interna (Figura 5 – a) dar-se-á por quatro processos diferentes: a falta de aderência, a ruptura dos grampos, por erosão regressiva ou devido à altura de escavação.

A ruptura externa (Figura 5 – b, c, d) trata-se do escorregamento de toda a estrutura de contenção ao longo a superfície de ruptura que, normalmente, não intercepta os grampos. Sua causa está comumente associada a baixa qualidade do solo de fundação ou ainda ao comprimento insuficiente dos grampos (FHWA,2015).

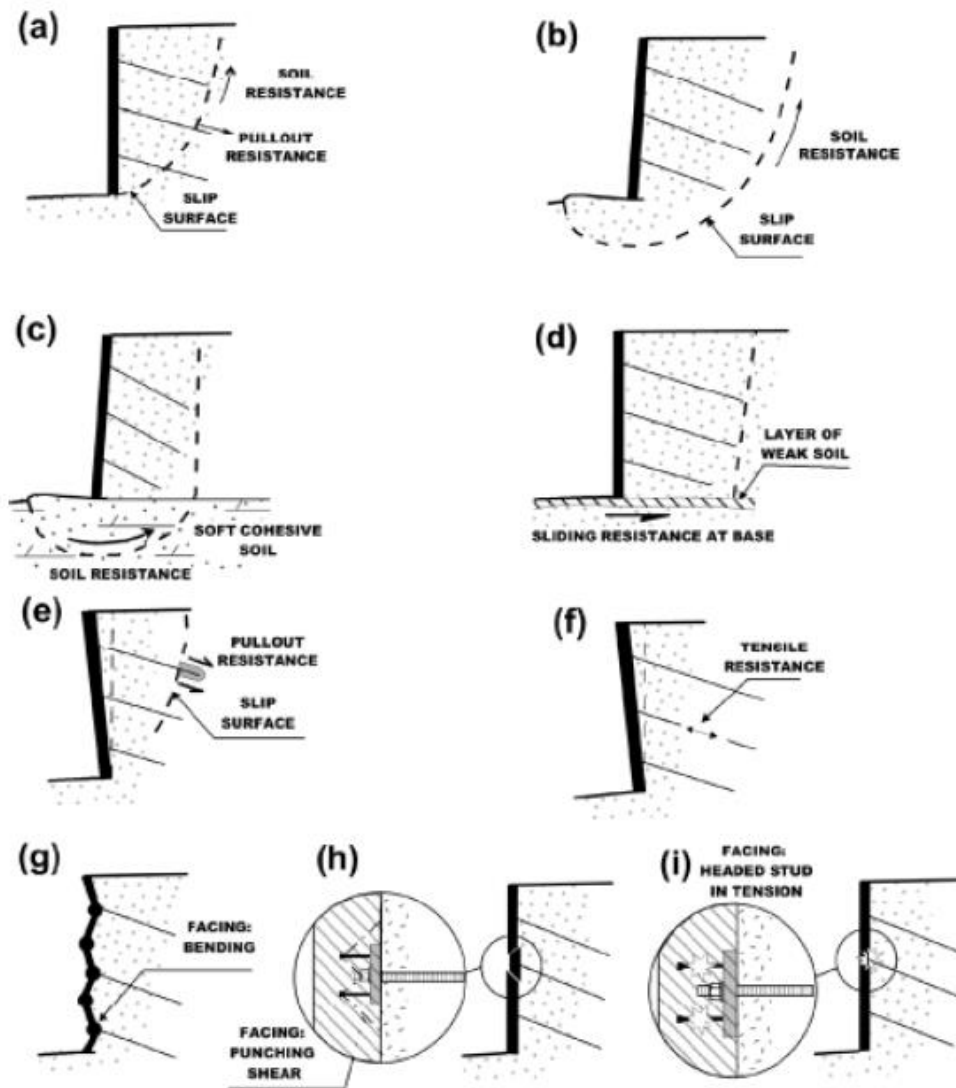
A ruptura por falta de aderência (Figura 5 – e, f) é causada pelo mau dimensionamento do comprimento dos grampos dentro da zona passiva, trata-se da consequência causada pela má estimativa da resistência ao cisalhamento. Os grampos, neste caso, são arrancados do solo. A ruptura interna causada por ruptura dos grampos é dada pelo mau dimensionamento da seção transversal da barra, ou ainda por processos corrosivos que diminuem o diâmetro do chumbador.

A ruptura interna também pode ocorrer devido à altura de escavação excessiva, causando uma instabilidade que se propaga até o topo da contenção. Trata-se de uma ruptura repentina. Há ainda a ruptura causada pela erosão regressiva, comumente conhecido pelo fenômeno de “*piping*”, quando devido a presença do fluxo de água, surgem forças de percolação capazes de arrastar o solo e causar uma baixa aderência na interface grampo-solo (FRANÇA, 2007).

Ainda há a ruptura de face, comumente causada devido a flexão do paramento (Figura 5 – g), pelo desprendimento da cabeça do grampo, causada pelo rompimento da placa situada junto ao paramento (Figura 5 – h) ou devido à falha nos parafusos localizados na placa (Figura 5 – i) (GONDIM, 2014 *apud* RONDI, 2021).

A ruptura mista é causada pela associação da ruptura interna e externa. Normalmente trata-se de uma baixa resistências ou baixo atrito de interface associado ao mau dimensionamento dos grampos (FRANÇA, 2007).

Figura 5 – Tipos de superfície de ruptura dos taludes



Fonte: FWHA, 2015

### 2.3 PARÂMETROS GEOTÉCNICOS

A estimativa das propriedades geomecânicas dos materiais envolvidos em um projeto geotécnico é de suma importância, pois, além de garantir economia e segurança ao projeto, influenciam os resultados das análises realizadas. Os parâmetros geotécnicos podem ser definidos diretamente, por meio de ensaios laboratoriais, ou indiretamente, por meio de cálculos e correlações empíricas (RONDI, 2021).

### 2.3.1 Ângulo de atrito

O ângulo de atrito interno do solo foi calculado por meio da correlação empírica com o índice de resistência à penetração ( $N_{SPT}$ ) de Hatakana & Uchida (1996 *apud* ALBUQUERQUE; GARCIA, 2020), conforme Equação 8.

$$\varphi = \sqrt{20 \cdot N_{SPT}} + 20^\circ \quad (8)$$

### 2.3.2 Módulo de elasticidade (Módulo de Young)

O módulo de elasticidade pode ser calculado pela Equação 9 (TEIXEIRA & GODOY, 1996 *apud* GONDIM, 2018) sendo  $q_c$ , determinado pela Equação 10, obtém-se a Equação 11. Os valores de  $\alpha$  e  $K$  podem ser obtidos de acordo com o tipo de solo, conforme apresentado nas Tabelas 3 e 4, respectivamente.

$$E = \alpha \cdot q_c \quad (9)$$

$$q_c = K \cdot N_{SPT} \quad (10)$$

$$E = \alpha \cdot K \cdot N_{SPT} \quad (11)$$

Tabela 3 – Valores do coeficiente  $\alpha$

Solo	$\alpha$
Areia	3
Silte	5
Argila	7

Fonte: (TEIXEIRA & GODOY, 1996 *apud* GONDIM, 2018)

Tabela 4 – Valores do coeficiente  $\alpha$

Solo	K (kPa)	Solo	K (kPa)	Solo	K (kPa)
Areia com pedregulhos	1100	Areia argilosa	550	Argila arenosa	300
Areia	900	Silte arenoso	450	Silte argiloso	250
Areia siltosa	700	Silte	350	Areia siltosa	200

Fonte: Autor (Adaptado de TEIXEIRA & GODOY, 1996 *apud* GONDIM, 2018)

### 2.3.3 Coeficiente de Poisson

O coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) do solo de análise foi adotado de acordo com a Tabela 5 que reúne os intervalos de valores para solos argilosos propostos por Coduto (2001, adaptado de Kulhawy, *et al.* 1983).



Tabela 5 – Peso específico de solos argilosos

<b>Solo ou rocha</b>	<b>v</b>
Solo saturado, condição não drenada	0,5
Argila parcialmente saturada	0,30 – 0,40
Areia densa, condição drenada	0,30 – 0,40
Areia solta, condição drenada	0,10 – 0,30
Arenito	0,25 – 0,30
Granito	0,23 – 0,27

Fonte: Coduto, 2001, adaptado de Kulhawy, *et al.*, 1983

### 2.3.3 Peso específico e coesão

O peso específico ( $\gamma$ ) do solo de análise foi adotado de acordo com a Tabela 6 que reúne os valores médios para solos argilosos propostos por Godoy (1972 *apud* Albuquerque; Garcia, 2020) e a coesão do solo ( $c$ ) foi adotado o valor de 15 kPa.

Tabela 6 – Peso específico de solos argilosos

<b>N (golpes)</b>	<b>Consistência</b>	<b>Peso específico (kN/m<sup>3</sup>)</b>
≤ 2	Muito mole	13
3 -5	Mole	15
6 -10	Média	17
11 - 19	Rija	19
≥ 20	Dura	21

Fonte: GODOY, 1972 *apud* CINTRA e AOKI, 2010

## 3 ESTUDO DE CASO

### 3.1 CARACTERIZAÇÃO

O presente trabalho tem como base os estudos realizados por Rondi (2021). Todos os dados pertinentes a contenção em solo grampeado remete ao seu trabalho e será utilizado as mesmas variações de larguras dos *pads* concreto armado para as análises, portanto são reconhecidos os seus devidos méritos.

A estrutura de contenção em estudo refere-se à contenção de um talude artificial que possui 9 metros de altura e 15 metros de comprimento com inclinação de 60°. A geometria do

talude pode ser visualizada na Figura 6. Além disso, os parâmetros geométricos do solo estão organizados na Tabela 7 e o valor da resistência de aderência unitária na Tabela 8.

Segundo Rondi (2021), o diâmetro adotado para os grampos foi de 100 mm, sendo o diâmetro da barra de aço de 25 mm, o comprimento L dos grampos de 10,8 m, sendo este comprimento medido ao longo da extensão do grampo e a inclinação em relação ao eixo horizontal é de 20°. Já em relação ao espaçamento entre os grampos, de acordo com Rondi (2021), os espaçamentos verticais ( $S_V$ ) e horizontais ( $S_H$ ) são de 1,0 m e 1,0 m, respectivamente. Além disso, a distância entre o topo do paramento até a primeira fileira de grampos é de 0,7 m e a distância entre o pé da escavação até a última fileira de grampos é de 0,7 m, acima do valor mínimo. A Figura 7 ilustra a vista do solo grampeado em face verde com os *pads* de concreto armado e as variações das larguras dele.

Figura 6 – Geometria do talude

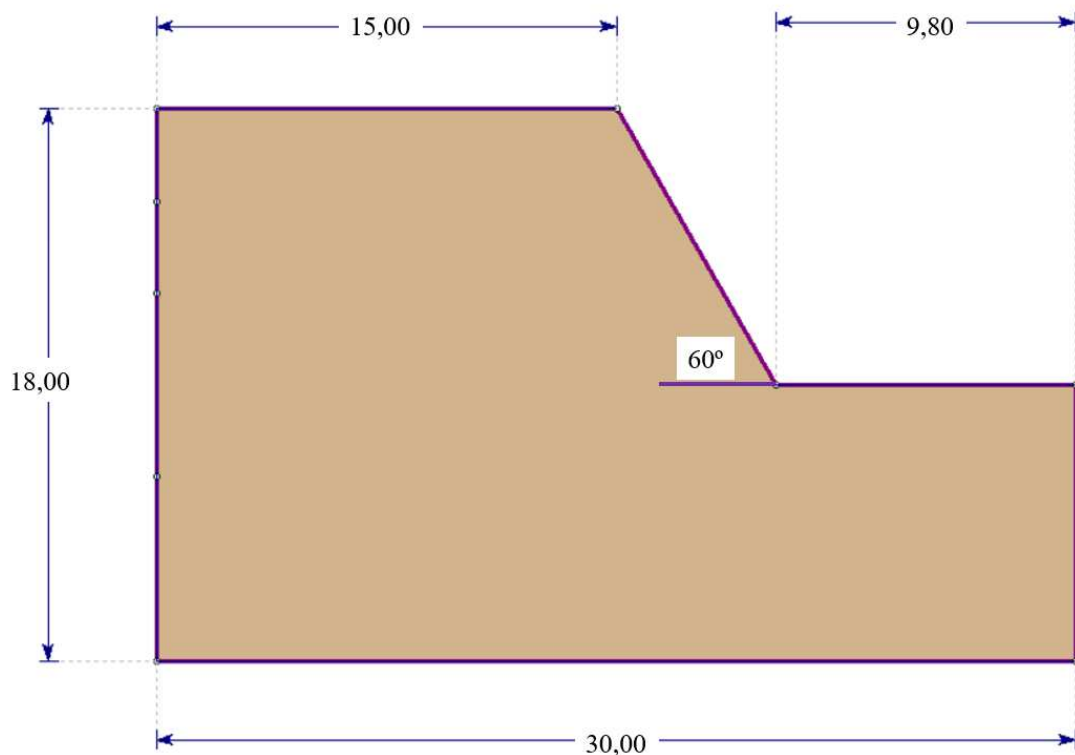
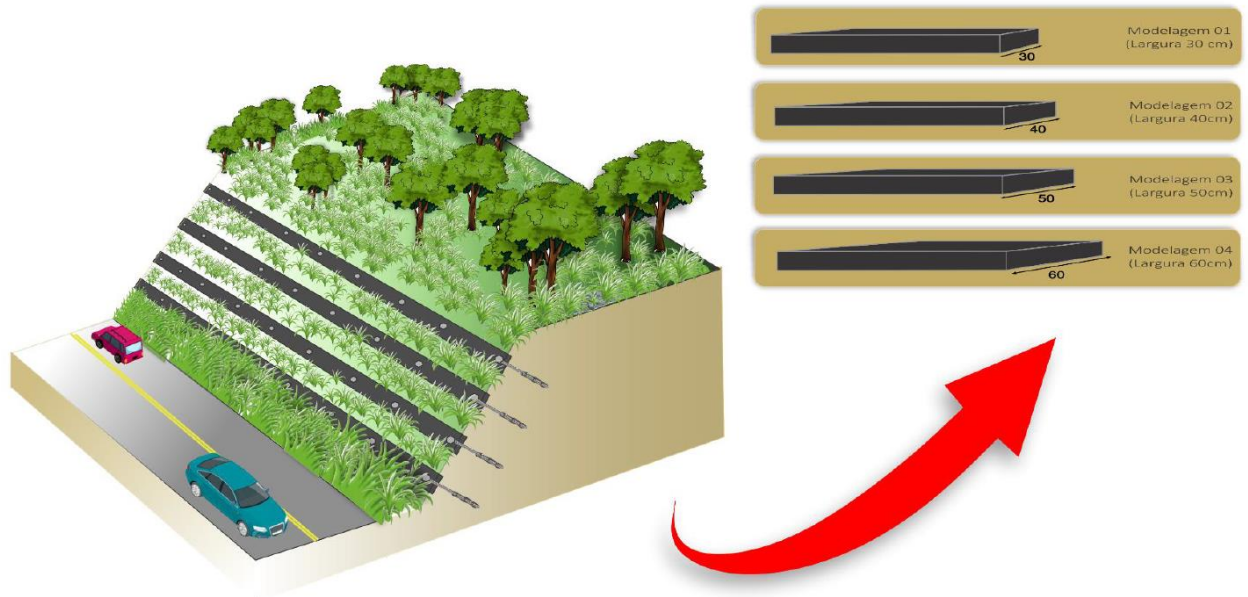


Tabela 7 – Parâmetros geotécnicos do solo

Camada de solo	$N_{SPT}$	Prof. (m)	Peso específico ( $kN/m^3$ )	Ângulo de atrito ( $^{\circ}$ )	Coesão ( $kN/m^2$ )	Poisson	Módulo de Young ( $kN/m^2$ )
Argila arenosa	4	18	15	29	15	0,33	8400

Fonte: Adaptado de RONDÍ (2021)

Figura 7 – Ilustração do talude com *pads* de concreto armado com variações de largura



Fonte: RONDI (2021)

Tabela 8 – Valor da resistência de aderência unitária (t)

Camada de solo	N <sub>SPT</sub>	Prof. (m)	q <sub>s</sub> (kPa)	q <sub>s,adm</sub> (kPa)	D (m)	t (kN/m)
Argila arenosa	4	3	150	116	0,1	36

Portanto, a força de aderência total do grampo de cada grampo é obtida multiplicando-se a força aderente unitária (t) pelo comprimento total (L = 10m), que resulta em 360 kN de capacidade ao arrancamento em termos admissíveis.

### 3.2 CHUMBADOR

A resistência à tração admissível da barra de aço utilizada no grampo foi determinada pela Equação 12 considerando o aço CA-50 com resistência à tração característica ( $f_{yk}$ ) de 500 MPa e diâmetro de 25 mm.

$$R_{T,adm} = f_{yd} \cdot A_{aço} \quad (12)$$

A força resistente ou de arrancamento do grampo considerada nas análises será a menor entre a capacidade estrutural e geotécnica. Assim, o valor considerado nas análises numéricas é de 213 kN por grampo.

### 3.3 SEQUÊNCIA DE ANÁLISE E FORÇA RESISTENTE DO GRAMPO

Primeiramente, verificou-se a estabilidade e os deslocamentos do talude de escavação sem reforço e com o reforço de solo grampeado sendo este composto por 10 linhas de grampos. Em seguida, analisou-se o comportamento da estabilidade e dos deslocamentos nos cenários em que houve a instalação dos *pads* de concreto variando a sua largura em 10 cm, resultando em larguras de 30 cm, 40 cm, 50 cm e 60 cm.

## 4 RESULTADOS E ANÁLISES

### 4.1 MODELAGEM

A criação e processamento dos modelos é dividida entre 3 programas, sendo que os modelos numéricos são construídos no programa *RS Modeler* e posteriormente processados pelo *RS Compute* e finalmente analisados por meio do *RS Interpret* onde é possível visualizar os resultados do processamento, também denominada como fase de pós-processamento.

Para a resolução dos modelos numéricos, o programa empregou o critério *Absolute Force and Energy* onde é avaliada a convergência dos valores das forças internas e externas que atuam nos nós dos elementos.

Durante a modelagem dos cenários foi adotado a malha graduada (*graded*) com elementos triangulares com 6 nós. O número de elementos e nós de cada cenário estão organizados na Tabela 9. Além disso, foi considerado de acordo com o ângulo de atrito do solo o coeficiente de empuxo ativo igual a 0,35 no plano vertical e horizontal em termos efetivos (*effective stress ratio – horizontal/vertical in-plane*) e em repouso igual a 0,52 para fora do plano vertical e horizontal (*effective stress ratio – horizontal/vertical out-of-plane*).

Os cenários modelados são:

- Cenário 1: Talude sem reforço
- Cenário 2: Talude reforçado com solo grampeado
- Cenário 3: Talude reforçado com solo grampeado e *pad* de concreto de 30 cm
- Cenário 4: Talude reforçado com solo grampeado e *pad* de concreto de 40 cm
- Cenário 5: Talude reforçado com solo grampeado e *pad* de concreto de 50 cm
- Cenário 6: Talude reforçado com solo grampeado e *pad* de concreto de 60 cm

Nas Figuras 7, 8 e 9 estão representados alguns dos cenários de análise e a Figura 10 representa o detalhamento da largura dos *pads* de concreto de 30, 40, 50 e 60 cm.

Tabela 9 – Número de elementos e nós em cada cenário

Cenário	Elementos	Nós
Sem reforço	1003	2098
Solo grampeado sem <i>pads</i>	1001	2094
<i>Pads</i> de 30 cm	1198	2509
<i>Pads</i> de 40 cm	1196	2503
<i>Pads</i> de 50 cm	1187	2486
<i>Pads</i> de 60 cm	1145	2402

Figura 7 – Cenário do talude sem reforço

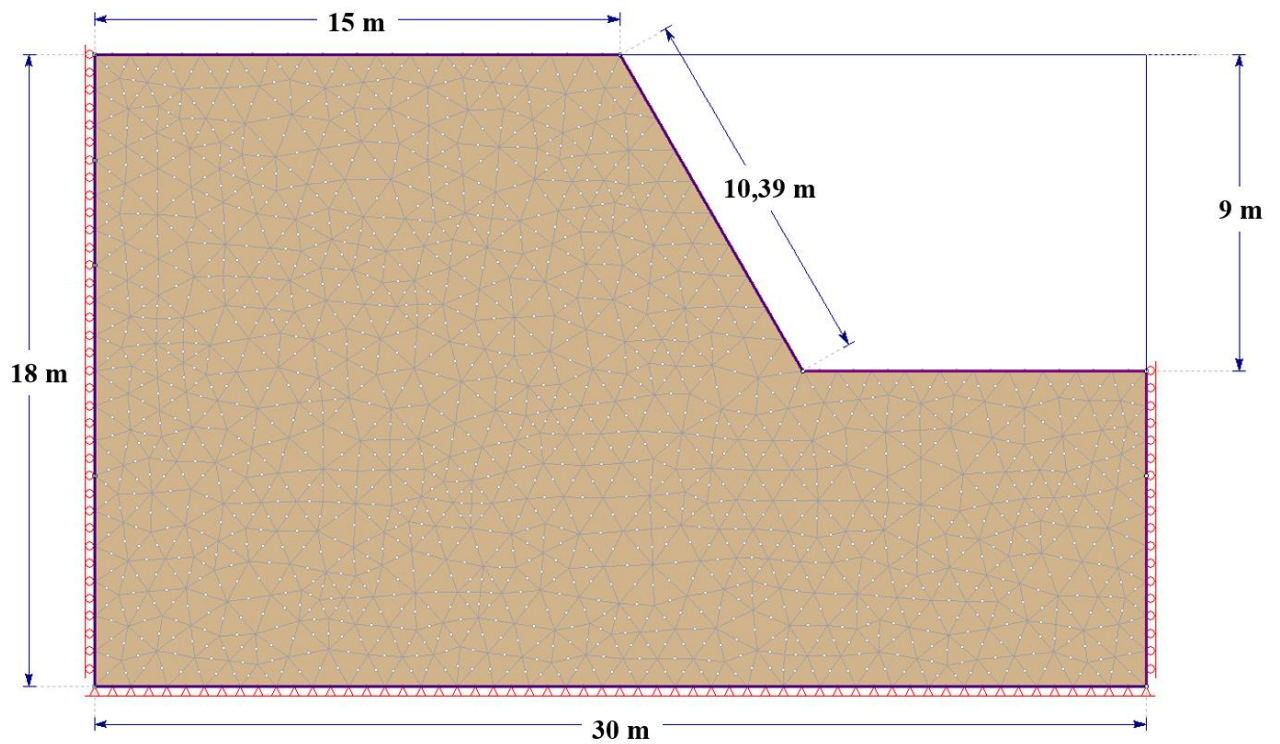


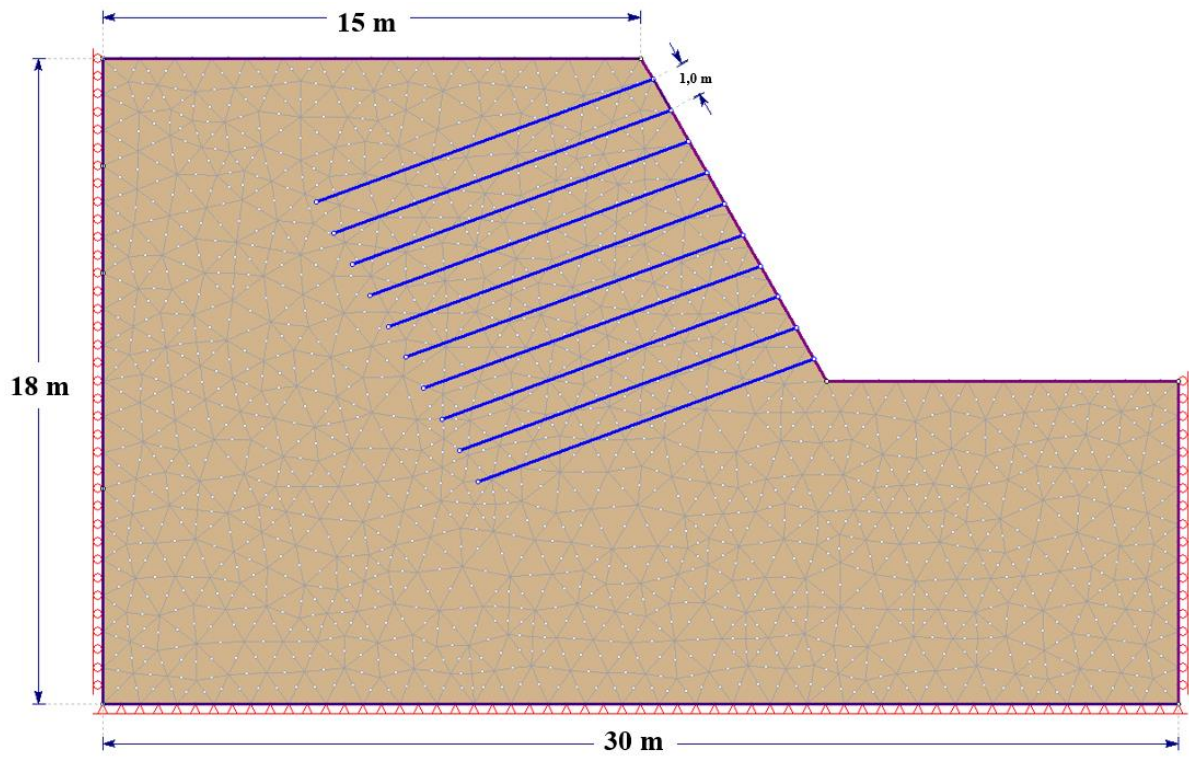
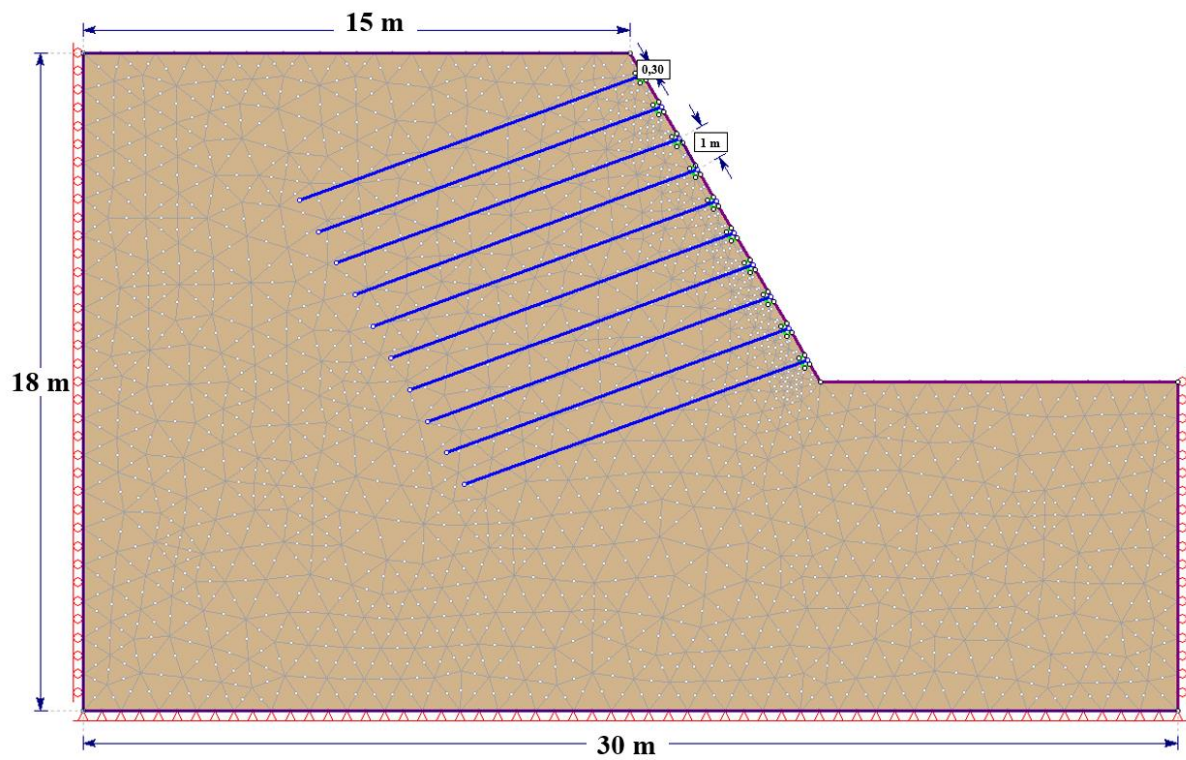
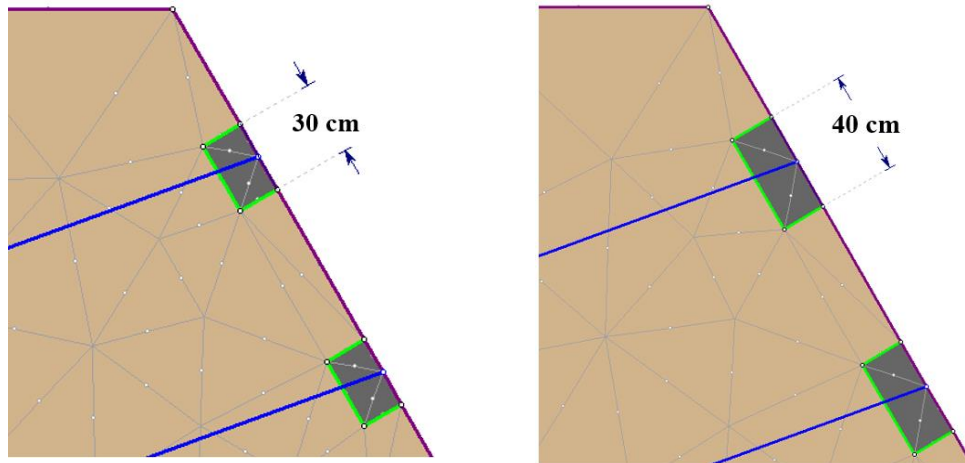
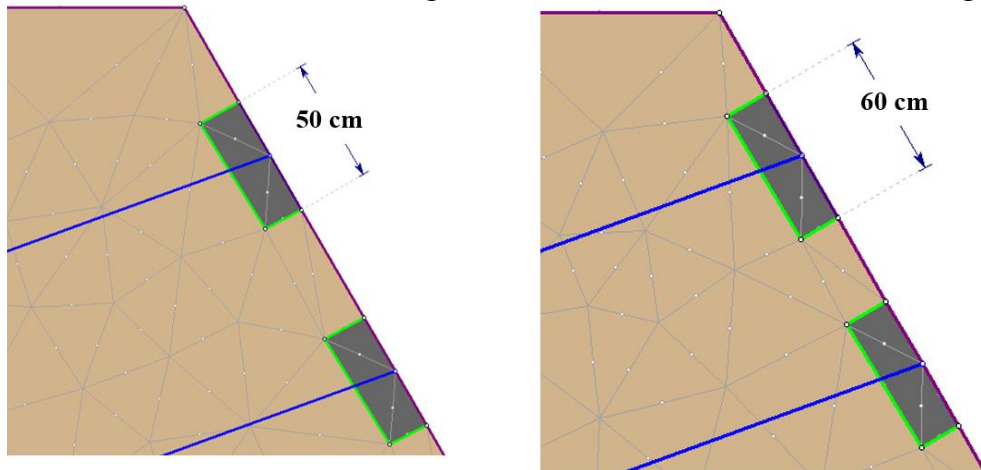
Figura 8 – Cenário do talude com solo grampeado sem *pads* de concretoFigura 9 – Cenário do talude com solo grampeado com *pads* de concreto de 30 cm

Figura 10 – Detalhamento da largura dos *pads* de concreto de 30, 40, 50 e 60 cm



*Pads* de concreto com 30 cm de largura

*Pads* de concreto com 40 cm de largura



*Pads* de concreto com 50 cm de largura

*Pads* de concreto com 60 cm de largura

## 4.2 RESULTADOS

Para calcular o fator de segurança do talude nos cenários de análise, utilizou-se uma opção existente no *software RS2* chamada “redução de resistência ao cisalhamento” (SSR). Após processar os cenários no software foram obtidos os valores de SRF críticos organizados na Tabela 10.

Tabela 10 – Valores de SRF

Cenário	SRF crítico
Sem reforço	1,26
Solo grampeado sem <i>pads</i>	2,67
<i>Pads</i> de 30 cm	2,69
<i>Pads</i> de 40 cm	2,67
<i>Pads</i> de 50 cm	2,71
<i>Pads</i> de 60 cm	2,68

Ao analisar os cenários em relação aos SRF críticos, observou-se que ao reforçar o talude com o solo grampeado, o SRF crítico aumentou de 1,26 para 2,67, ou seja, houve um acréscimo de aproximadamente 110%. Entretanto, quando comparados os valores encontrados de SRF crítico para o solo grampeado com e sem *pads*, o aumento foi muito baixo. Isso mostra que o paramento vertical não influencia tanto no valor final do SRF e um dos motivos é que está chegando pouca carga na região dos *pads* e da cabeça do grampo. Na Tabela 11 estão organizados os valores máximos e mínimos de carga nos grampos em cada cenário.

Tabela 11 – Cargas máximas e mínimos nos grampos

Cenário	Carga mínima (kN)	Carga máxima(kN)
Solo grampeado sem <i>pads</i>		200
<i>Pads</i> de 30 cm		181
<i>Pads</i> de 40 cm	≈ 0	71
<i>Pads</i> de 50 cm		84
<i>Pads</i> de 60 cm		41

Além disso, quando se observa o comportamento geral da carga nos diagramas, o grampo mais solicitado é o mais próximo do pé do talude, entretanto, esse comportamento não é observado no cenário com solo grampeado com *pads* de concreto de 30 e 40 cm. Nesses casos, o grampo mais solicitado é o quarto grampo contando de baixo para cima e o penúltimo grampo, respectivamente. Outro comportamento observado com a inserção dos *pads* é que os valores das cargas máximas diminuíram se comparado com o solo grampeado sem os *pads*.

Já ao analisar os cenários em relação os deslocamentos médios, verticais e horizontais, comparando o solo grampeado com e sem *pads* e adotando 1,5 como valor de fator de segurança (SRF), observa-se que na crista e face do talude, os deslocamentos horizontais médios variaram entre 9 e 20 mm, respectivamente. Já os deslocamentos verticais médios variaram entre 3 e 35 mm, respectivamente na face e crista do talude (Tabela 12). Esses deslocamentos horizontais encontrados estão de acordo com os valores admissíveis disponíveis na literatura internacional que variam de 2H/1000 até 4H/1000, ou seja, 18 a 36 mm.



Tabela 12 – Valores dos deslocamentos médios horizontais e verticais

Cenário	Fator de segurança	Crista		Talude	
		$\delta_{mh}$ (mm)	$\delta_{mv}$ (mm)	$\delta_{mh}$ (mm)	$\delta_{mv}$ (mm)
Solo grampeado sem <i>pads</i>	1,5	9,5	35,7	19,4	4,7
<i>Pads</i> de 30 cm	1,5	9,6	35,8	20,8	3,9
<i>Pads</i> de 40 cm	1,5	10,0	35,9	21,0	4,0
<i>Pads</i> de 50 cm	1,5	9,5	35,7	20,7	3,9
<i>Pads</i> de 60 cm	1,5	9,9	35,6	20,8	4,1

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados e análises realizadas, verificou-se que a técnica de solo grampeado aumentou significativamente a estabilidade preconizada pela norma brasileira, ou seja, SRF igual ou superior a 1,5. A substituição do concreto projetado integralmente na face do talude por faixas de concreto (*pads*) na face dos taludes reforçados com solo grampeado não apresentou influência significativa, tanto no aspecto do fator de segurança quanto em deslocamento, uma vez que os valores obtidos apresentaram baixa variação. Isso mostra que, sob o aspecto da economia, a substituição do paramento vertical por *pads* de concreto pode ser uma solução viável para garantir a proteção e conservação da “cabeça” do grampo. Entretanto, não houve constatação de que a inserção de *pads* de concreto tenha melhorado o desempenho dos grampos ou do solo grampeado como um todo no tocante a estabilidade do talude. Além disso, a carga medida na “cabeça” dos grampos é praticamente nula, comparada ao solo grampeado sem nenhum concreto projetado na face do talude.

Os valores obtidos para os deslocamentos horizontais estão dentro do intervalo disponível na literatura internacional, ou seja, de 2H/1000 (18 mm) até 4H/1000 (36 mm).

## REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, P. J. R.; GARCIA, J. R. **Engenharia de Fundações**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020.

ALDER, D.; JONES, C. J. F. P.; LAMONT-BLACK, J.; WHITE, C.; GLENDINNING, S.; HUNTLEY, D.; WINTER, M. G.; SMITH, D. M.; ELDRED, P. J. L.; TOLL, D. G. **Design principles and construction insight regarding the use of electrokinetic techniques for slope stabilisation**. Proceedings of XVI ECSMGE, p. 1531–1536, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5629: **Execução de tirantes ancorados no terreno**. Rio de Janeiro, 2016, 2018a.

CLOUTERRE. **Recomendations Clouterre 1991 – Soil nailing recommendations for designing, calculating, constructing and inspecting earth support systems using soil nailing.** French National Project Clouterre, English Language Translation, 1991. 302p.

CODUTO, D.P. **Foundation Design: Principles and Practices.** 2nd ed. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 2001.

FHWA. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION ADMINISTRATION FEDERAL HIGHWAY. **Soil Nail Walls-Reference Manual.** n. October, p. 425, 2015.

FEIJÓ, R.L. **Monitoração de uma escavação experimental grampeada em solo residual gnáissico não saturado.** Tese de Doutorado. Rio de Janeiro: COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007, 157p.

FRANÇA, F. A. N. **Ensaio de arrancamento em solo grampeado executados em laboratório.** 2007. Dissertação. (Mestrado em Geotecnia). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

GEORIO. **Manual Técnico de Encostas.** v. 1, 2014.

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de Taludes.** 2 ed. São Paulo: Oficina do Texto, 2016.

GONDIM, A. **Dimensionamento geotécnico de solo grampeado.** Trabalho de Conclusão de Curso. Graduação em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 107 p. 2018.

GREENWAY. **Vegetation and Slope Stability.** 1987.

HAMMAH, R. E.; YACOUB, T. E.; CORKUM, B. C.; CURRAN, J. H. **The Shear Strength Reduction Method for the Generalized Hoek-Brown Criterion.** American Rock Mechanics Association. 2005.

LIMA, A. P. **Comportamento de uma escavação grampeada em solo residual de gnaiss.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

LIMA, A. P. **Deformabilidade e estabilidade de taludes em solo grampeado.** Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2002. 180p.

MAGALHÃES, M. A. **Resistência ao arrancamento de grampos com fibras de polipropileno.** 2005. Dissertação. (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

MIRANDA, F. H. **Estudo da resistência ao cisalhamento na interface solo-grampo com o uso de calda aditivada e calda convencional.** Dissertação (Título de Magister Scientiae). Programa de Pós-graduação, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais. p. 169, 2019.

OFFICE, G. E. **Guide to Soil Nail Design and Construction Geotechnical Engineering Office Civil Engineering and Development Department**. The Government of the Hong Kong Special Administrative Region. p. 93, 2017.

ORTIGÃO, J. A. R.; PALMEIRA, E. M.; ZIRLIS, A. **Experiência com solo grampeado no Brasil: 1970-1993**. Solos e Rochas, v. 16 no. 4, pp. 291-304, 1993.

ORTIGÃO, J. A. R.; SAYAO, A. S. **Handbook of Slope Stabilisation**. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, 2004.

PEREIRA, A. B. **Estudos numéricos do comportamento tensão-deformação de estruturas em solo grampeado**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

PEREIRA, M. **Emprego de tirantes para diminuição dos Deslocamentos em contenção executada em solo grampeado**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia/MG, 2018.

RIBEIRO, S. G. S. **GU6 – Solo Grampeado**. Belo Horizonte, Geofast, 2015.

ROCSCIENCE. **Mohr-Coulomb Material Model**. 2021. Disponível em: <<https://www.rocscience.com/help/rs2/assets/docs/5-mohr-coulomb%20model.pdf>> . Acesso em, 18 out. 2021.

ROCSCIENCE. **Overview of Shear Strength Reduction (SSR) in RS2**. 2021. Disponível em: <[https://www.rocscience.com/help/rs2/phase2\\_model/shear\\_strength\\_reduction\\_overview.htm](https://www.rocscience.com/help/rs2/phase2_model/shear_strength_reduction_overview.htm)> . Acesso em, 05 out. 2021.

RONDI, L. A. **Relatório de Iniciação Científica: Estudo do comportamento geotécnico de taludes reforçado em solo grampeado com face verde**. 2021.

SOUZA, G. J. T. **Solo grampeado**. SOLOTRAT. 2020. Disponível em: <<https://www.solotrat.com.br/pdf/solo-grampeado.pdf>>. Acesso em, 15 set. 2021.

SPRINGER, F. O. **Ensaio de arrancamento de grampos em solo residual de gnaiss**. Tese de Doutorado – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

SPRINGER, F. O. **Estudos da deformabilidade de escavações com solo grampeado**. Dissertação de Mestrado – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001. 94p.

TEIXEIRA, I. J. R. **Estudo comparativo de duas alternativas para contenção de taludes verticais: solo grampeado e cortina atirantada**. Trabalho de Conclusão de Curso. Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Tecnologia, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 123 p. 2011.