



**TACIANE CRISTINA BARBOSA RANGEL**

**ANÁLISE NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE MUROS  
DE SOLO REFORÇADO DE FACES PLANA E CÔNCAVA  
COM DIFERENTES INCLINAÇÕES DA FACE**

**LAVRAS-MG  
2021**

**TACIANE CRISTINA BARBOSA RANGEL**

**ANÁLISE NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE MUROS DE SOLO  
REFORÇADO DE FACES PLANA E CÔNCAVA COM DIFERENTES  
INCLINAÇÕES DA FACE**

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

Profa. Me. Raquel Mariano Linhares  
Orientadora


**LAVRAS-MG  
2021**

**TACIANE CRISTINA BARBOSA RANGEL**

**ANÁLISE NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE MUROS DE SOLO  
REFORÇADO DE FACES PLANA E CÔNCAVA COM DIFERENTES  
INCLINAÇÕES DA FACE**

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 23 de abril de 2021.  
Profa. Me. Raquel Mariano Linhares UFLA  
Prof. Dr. Eduardo Souza Cândido UFLA  
Eng. Me. Luiz Augusto da Silva Florêncio UFRN

  
Profa. Me. Raquel Mariano Linhares  
Orientadora

**LAVRAS-MG  
2021**

*À minha avó Dona “Inhá”, que partiu para a morada eterna, dedico este trabalho que representa o primeiro diploma universitário da nossa família.*

## AGRADECIMENTOS

Acredito que todas as conquistas da vida, sempre vem acompanhadas de mãos que são estendidas durante nossa trajetória, por isso sou grata por todas as minhas conquistas e também por todos aqueles que me ajudaram a alcançá-las.

Agradeço a Deus pelo dom da vida, por iluminar todos os meus passos até aqui e por ter me dado força e sabedoria para conseguir finalizar mais essa etapa. Sou grata a Virgem Maria, “minha mãezinha”, por me cobrir de bênçãos e por me guiar sempre pelos melhores caminhos.

À minha família, por não pouparem esforços durante todos esses anos para a realização dos meus sonhos e por sempre buscarem junto comigo a conquista dos meus objetivos.

À Suzi, minha professora de matemática do ensino médio, que acreditou em mim antes mesmo que eu acreditasse.

Ao Pedro, pelo apoio e cuidado incessantes comigo em todos os momentos que mais precisei durante essa etapa.

À minha orientadora Raquel, pela paciência e disposição de me passar todo o conhecimento e direcionamento necessários para a realização desse trabalho. Agradeço também pela empatia nos momentos mais turbulentos.

À todos os meus demais professores, pelo trabalho árduo que tiveram para que o conhecimento chegasse até a mim da melhor forma possível.

Ao Matheus e Carlos, por me auxiliarem nos momentos de dúvidas e também por me incentivarem durante o desenvolvimento do presente trabalho.

À Universidade Federal de Lavras, por ter sido minha casa e por ter me proporcionado tanto amadurecimento.

À Mariane, por ser minha família em Lavras durante esses cinco anos e por sempre me impulsionar na busca pela minha melhor versão.

Aos meus amigos de graduação, em especial Luiza, Matheus, Mamute, Carlos e Victor que estiveram comigo em todos os momentos dessa trajetória, agradeço pela amizade e apoio.

Aos meus amigos, Lucas, Marcela, Ana, Cath, Arthur e Rafael agradeço por serem minhas inspirações durante essa caminhada.

À Enactus e todas as amigas que floresceram na minha passagem pelo núcleo, agradeço por me mostrarem da forma mais bonita que o mais importante é usar o nosso conhecimento, tempo e disposição em favor daqueles que mais precisam.

A vida é um constante processo de evolução e a finalização dessa etapa é a confirmação de que novos caminhos serão trilhados.

*“O essencial é invisível aos olhos.”*

*(O Pequeno Príncipe)*

## RESUMO

Os muros de solo reforçado (MSRs) são utilizados comumente na engenharia pois essas estruturas são caracterizadas por possuir a associação solo-reforço o que promove tanto resistência a compressão, quanto resistência a tração para a estrutura. O comportamento dos MSRs é impactado diretamente pelas suas características, como por exemplo, a inclinação e a geometria da face. Estudos apontam que muros de face côncava promovem maior estabilidade em comparação a face plana. Logo, para analisar a influência da variação dos aspectos citados, foram feitas no presente estudo análises numéricas de seis modelos no *software* Plaxis. Foram consideradas geometrias da face plana e côncava e as seguintes angulações da face com a vertical: 38,65°, 21,80° e 5,71°. Por meio das análises numéricas, foi possível analisar para todos os modelos as tensões desenvolvidas nos reforços, o comportamento das tensões máximas em relação a profundidade do muro, assim como foram analisados também os deslocamentos horizontais e verticais sofridos pela estrutura. Com isso, obteve-se resultados que comprovam que muros de face mais verticalizadas mobilizam mais tensões nos reforços em comparação aos muros de face mais abatidas. Além de que a concavidade da face gerou maiores tensões nos reforços de muros de face mais abatida que nesses mesmos muros de face plana. Os maiores deslocamentos (verticais e horizontais) dentre todos os modelos foram encontrados nos muros mais verticalizados e ao se comparar os muros mais abatidos tem-se que os maiores deslocamentos ocorrem na face côncava.

**Palavras-chave:** MSRs. Geometria da face. Inclinação da face. Reforços. Tensão máxima. Deslocamentos.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Perfil de um muro de solo reforçado. ....	13
Figura 2 - Exemplos das formas construtivas da face: (A) autoenvelopada, (B) placas de concreto e (C) blocos segmentados. ....	14
Figura 3 - Exemplo de: (A) geogrelha, (B) geotêxtil tecido e (C) geotêxtil não- tecido.....	15
Figura 4 - Mecanismos de verificação da estabilidade externa: A- Deslizamento; B- Tombamento; C- Capacidade de carga da fundação; D- Instabilidade global. ....	16
Figura 5 - Mecanismos de verificação da estabilidade interna: A- Ruptura do reforço; B- Arrancamento do reforço; C- Desprendimento da face; D- Instabilidade local. ....	16
Figura 6 - Divisão da Zona Ativa e Passiva dentro do MSR.....	17
Figura 7 - Tensão solo- reforço. ....	18
Figura 8 - Ábaco para determinação da força de tração no reforço. ....	19
Figura 9 - Ponto de atuação do $T_{máx}$ . ....	20
Figura 10 - Centro do arco circular. ....	21
Figura 11 - Perfis do muro de faces plana e côncava com inclinações: (A)- 1/1,25; (B) 1/2,5 e (C)1/10.....	25
Figura 12 - Restrições de movimentação aplicadas nos modelos. ....	26
Figura 13 – Malha gerada na análise. ....	26
Figura 14 - Detalhes construtivos dos modelos.....	27
Figura 15 - Criação e habilitação das fases dos modelos. ....	27
Figura 16 - Somatório das tensões máximas de tração no reforço com carregamento. ....	28
Figura 17 - Tensão máxima no reforço x Profundidade do reforço: (A) 0 kPa e (B) 100 kPa. ....	30
Figura 18 - Deslocamentos horizontais: (A) 0 kPa e (B) 100 kPa. ....	32
Figura 19 - Deslocamentos verticais: (A) 0 kPa e (B)100 kPa.....	34



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características das modelagens numéricas.....	23
Tabela 2 - Parâmetros dos muros de face côncava.....	23
Tabela 3 - Características geotécnicas do solo utilizado.....	24
Tabela 4 - Características do faceamento e do reforço.....	24
Tabela 5 - Diferença do $\sum T_{\text{máx}}$ entre o muro de face côncava e de face plana. ....	28
Tabela 6 - Comparação do $\sum T_{\text{máx}}$ entre muros de diferentes inclinações. ....	29
Tabela 7 - Inclinação da reta.....	29
Tabela 8 - Média dos deslocamentos horizontais (0 kPa). ....	33

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	11
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	13
2.1	Componentes do MSR.....	13
2.2	Comportamento do MSR.....	15
2.3	Métodos numéricos.....	22
3	MATERIAIS E MÉTODOS .....	23
3.1	Geometria dos muros .....	23
a.	<i>Inputs</i> .....	24
b.	Etapas construtivas e de carregamento .....	26
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	28
4.1	Tensões máximas de tração desenvolvidas nos reforços ( $T_{máx}$ ).....	28
4.2	Deslocamentos horizontais.....	31
4.3	Deslocamentos verticais .....	33
5	CONCLUSÕES.....	36
5.1	Sugestões de trabalhos .....	37
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	38

## 1 INTRODUÇÃO

As estruturas de contenção são elementos advindos dos conhecimentos da engenharia que têm um grande papel no dia a dia da maioria da população. Rodovias, pontes, usinas, ferrovias e barragens são alguns exemplos de obras que necessitam direta ou indiretamente de estruturas de contenção que lhes possibilitem condições de operação. Tal fato gera impacto na qualidade de vida e na segurança da sociedade como um todo e, conseqüentemente, leva a busca pelo aperfeiçoamento da execução desse tipo de obra geotécnica que sempre se fez extremamente necessária.

O muro de solo reforçado (MSR) é um tipo de estrutura de contenção que por meio da interação solo-reforço promove a estabilidade e a segurança necessárias em áreas consideradas instáveis. A procura pela obtenção de características mecânicas melhores viabiliza a utilização do solo associado aos reforços. O solo, após compactação adequada, demonstra boa resistência à compressão e ao cisalhamento, enquanto os reforços suprem as necessidades de resistência à tração do sistema (EHRLICH, AZAMBUJA, 2003). Em suma, os dois materiais atuam de forma conjunta proporcionando as funcionalidades esperadas para esse tipo de estrutura de contenção. Esse mecanismo é utilizado de maneira rudimentar há milênios, mas sua metodologia começou a se desenvolver na década de 1960, com a técnica denominada Terra Armada que preconizava a utilização de inclusões metálicas nos MSRs. Nessa mesma época, devido ao advento da indústria polimérica, começaram-se a aplicar também geotêxteis como ferramenta de reforço dessas estruturas (EHRLICH, AZAMBUJA, 2003).

A utilização de MSR é vantajosa em vários aspectos, pois, com ela, é possível obter uma diminuição nos gastos quando comparado com muros tradicionais de gravidade de concreto, por exemplo. Outro fator importante é a facilidade de adaptação à diferentes tipos de subsolo e de carregamento que obras desse tipo possuem (EHRLICH, AZAMBUJA, 2003). No que se refere à velocidade construtiva, os MSRs, apresentam execução rápida e pouco complexa, além de serem esteticamente interessantes quando finalizados.

Nessa perspectiva, sabe-se que além das vantagens da execução desse tipo de estrutura, é necessário também dar relevância às particularidades do comportamento dessas estruturas. O dimensionamento de cada projeto de MSR é feito com base em dados característicos, como por exemplo, as condições ambientais e as sobrecargas atuantes (EHRLICH, BECKER, 2009). Além desses fatores, a altura do muro, a rigidez, a geometria e o ângulo de inclinação da face da estrutura, assim como o comprimento e a rigidez do reforço também influenciam no comportamento da estrutura e apresentam diferentes especificidades (DANTAS, 2004).

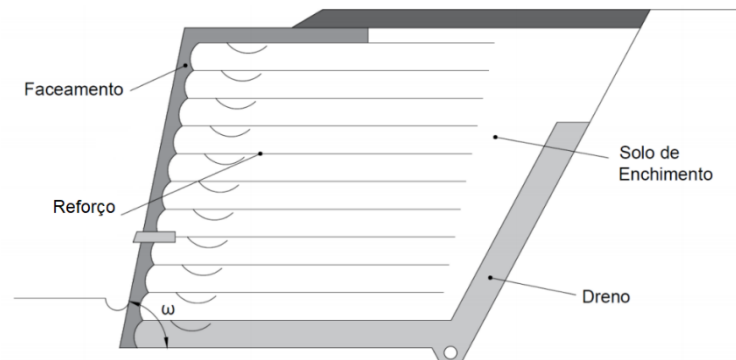
Sendo assim, objetiva-se com esse trabalho, estudar, por meio de ferramenta computacional, o efeito combinado da inclinação da face e geometria da contenção na performance do MSR. Foi feita uma análise comparativa de MSRs de faces plana e côncava, quando construídos com três inclinações diferentes. A performance dos muros foi avaliada por meio das tensões de tração desenvolvidas nos reforços, os deslocamentos verticais e horizontais sofridos pelos muros em duas fases: (i) durante o processo construtivo e (ii) ao final de um carregamento uniforme aplicado no topo de até 100 kPa.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Componentes do MSR

Abaixo são apresentados e brevemente descritos os principais componentes de um MSR, sendo eles: (a) face; (b) reforços; (c) solo de enchimento e (d) sistema de drenagem (Figura 1).

Figura 1 - Perfil de um muro de solo reforçado.



Fonte: Adaptado de Ehrlich e Becker (2009).

- (a) A face tem diversas funcionalidades, como evitar a erosão superficial e realizar a proteção da estrutura. Diferentes materiais podem ser usados na execução do faceamento, sendo eles rígidos ou flexíveis (concreto, elementos metálicos, argamassa projetada, etc). As formas construtivas também são variadas: autoenvolvimento, blocos segmentados, placas segmentadas ou inteiriças (Figura 2). A Sociedade Alemã de Geotecnia (2011), classifica a face autoenvolvida como um elemento flexível com rigidez desprezível, onde o solo de enchimento é envolvido pelo próprio reforço; por sua vez, a face composta por blocos ou placas segmentadas é considerada um elemento rígido, com baixa compressibilidade vertical e alta rigidez a flexão.

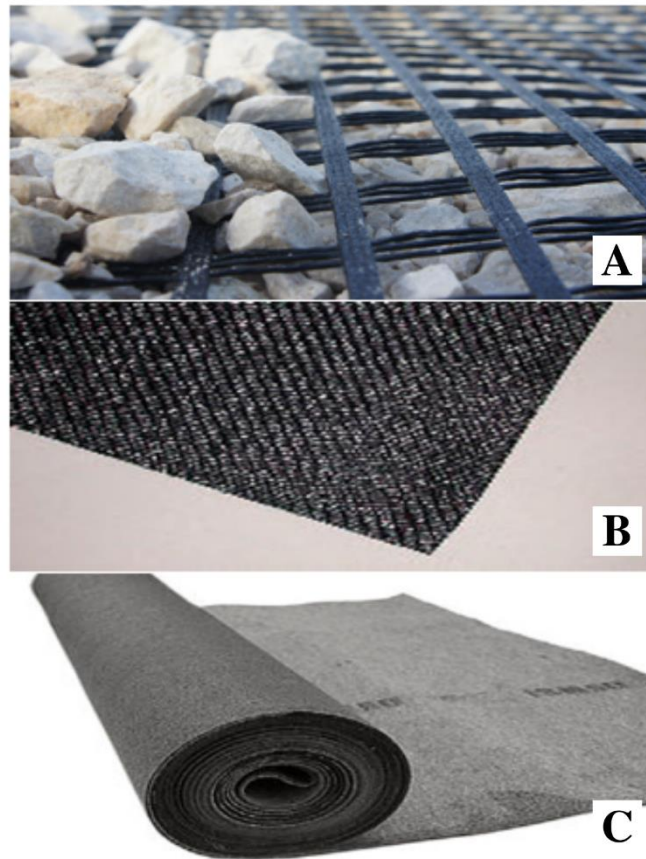
Figura 2 - Exemplos das formas construtivas da face: (A) autoenvelopada, (B) placas de concreto e (C) blocos segmentados.



Fonte: (A) Diprotec (2021), (B) Muro Armado (2021) e (C) Diprotec (2021).

- (b) No que se refere ao tipo de reforço utilizado, existe uma variedade de materiais que podem caracterizar esse elemento. As tiras metálicas, que foram os primeiros reforços utilizados na era moderna por meio da técnica da “Terra Armada” (VIDAL, 1969), ainda são utilizadas atualmente. Já os geossintéticos, difundidos em meados da década de 1980 devido ao advento da indústria polimérica (HOLLAWAY E HEAD, 2001), se subdividem em diferentes categorias: geotêxteis, geogrelhas, geomembranas, geomanta, geocompostos, entre outros. Na atuação como reforço, os geotêxteis (tecidos e não tecidos) e as geogrelhas (rígidas e flexíveis) são os materiais mais comumente utilizados (Figura 3). Estas se apresentam em formato de grelha, são plásticas de estrutura plana e produzidas especialmente para atuarem como reforço de solo; aqueles são mais versáteis e podem desempenhar outras funcionalidades como drenagem e filtração. A rigidez do reforço utilizado influencia diretamente na condição de equilíbrio interno da estrutura (EHRlich, AZAMBUJA, 2003), tópico que será abordado detalhadamente mais adiante.

Figura 3 - Exemplo de: (A) geogrelha, (B) geotêxtil tecido e (C) geotêxtil não- tecido.



Fonte: (A) Diprotec (2021), (B) Archiexpo (2021), (C) Archiexpo (2021).

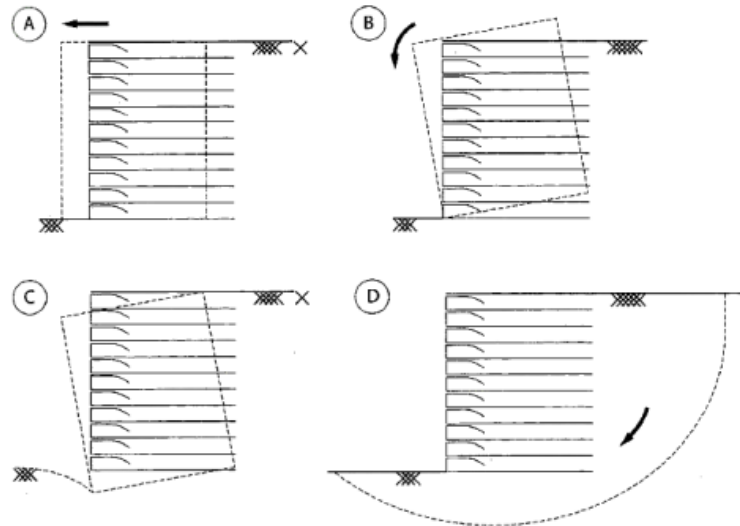
- (c) Uma grande vantagem do MSR em relação às estruturas de contenção convencionais é a possibilidade de utilização do solo local como material de enchimento. Contudo, argilas orgânicas, argilas moles, turfas e solos granulares ricos em mica devem ser descartados na execução de um MSR devido a sua baixa resistência cisalhante e alta compressibilidade (EHRlich, BECKER, 2009).
- (d) O sistema de drenagem tem papel fundamental no dimensionamento e operação dessa estrutura, uma vez que se tende a assumir a hipótese de que as poropressões são nulas na massa de solo reforçado.

## 2.2 Comportamento do MSR

Quando se trata do comportamento e, por conseguinte, do dimensionamento de MSR, é necessário verificar as condições de estabilidade externa e interna. Assim como qualquer estrutura de contenção de gravidade, a verificação da estabilidade externa garante que o MSR não vá deslizar e/ou tombar, como também analisa a capacidade de carga do solo de fundação

e a estabilidade global (Figura 4). É válido ressaltar que possíveis sobrecargas externas atuantes sobre a estrutura de contenção devem ser consideradas na análise da estabilidade externa (EHRLICH, BECKER, 2009).

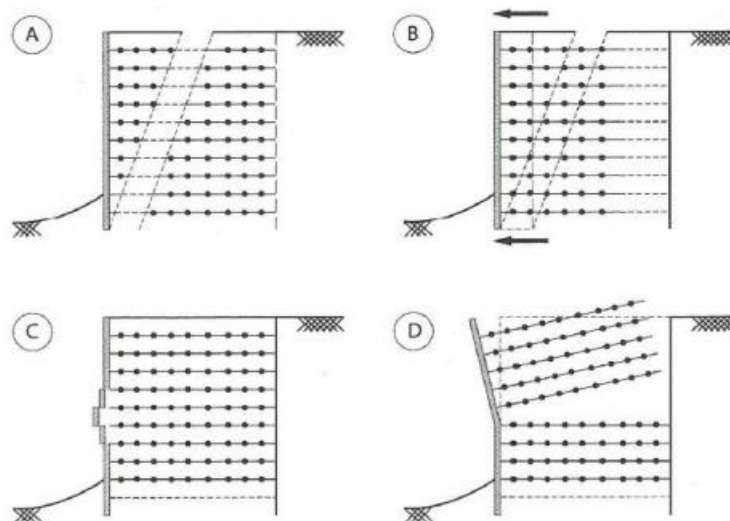
Figura 4 - Mecanismos de verificação da estabilidade externa: A- Deslizamento; B- Tombamento; C- Capacidade de carga da fundação; D- Instabilidade global.



Fonte: Ehrlich, Becker (2009).

Já a verificação da estabilidade interna assegura a não ocorrência da ruptura e/ou do arrancamento dos reforços e o desprendimento da face ou instabilidade local (Figura 5) (EHRLICH, BECKER, 2009).

Figura 5 - Mecanismos de verificação da estabilidade interna: A- Ruptura do reforço; B- Arrancamento do reforço; C- Desprendimento da face; D- Instabilidade local.

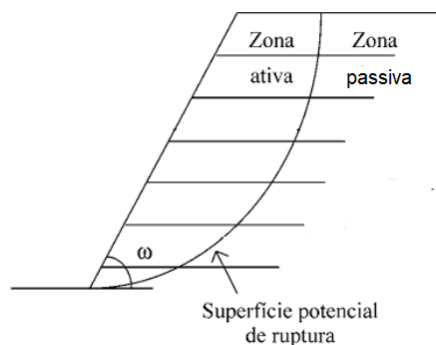


Fonte: Ehrlich, Becker (2009).



Nesse contexto, um fator significativo que se relaciona com os mecanismos analisados é a máxima tensão de tração desenvolvida no reforço ( $T_{m\acute{a}x}$ ), pois ela se relaciona com a superfície potencial de ruptura (SPR) dentro da massa reforçada, dividindo-a em Zona Ativa e Zona Passiva. A Zona Ativa caracteriza a parte do maciço de solo que é instável e tende ao escorregamento onde a movimentação relativa entre o solo e o reforço ocorre no sentido oposto ao da Zona Passiva que é a região estável do MSR (EHRlich, AZAMBUJA, 2003) (Figura 6).

Figura 6 - Divisão da Zona Ativa e Passiva dentro do MSR.



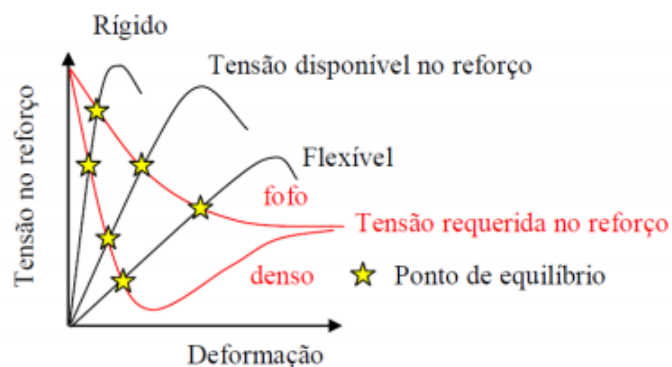
Fonte: Adaptado de Dantas, Ehrlich (2000a).

Para impedir a ruptura do reforço, é necessário definir em projeto o tipo de geossintético que será empregado com base na previsão de  $T_{m\acute{a}x}$ , levando em consideração condições ambientais e de instalação, assim como o tempo de vida útil considerado no projeto. Sendo assim, o geossintético definido não deverá apresentar resistência de projeto inferior à previsão de  $T_{m\acute{a}x}$ . Durante a realização do projeto deve ser garantido um embutimento mínimo do reforço na zona passiva, para que o arrancamento seja evitado, sendo resguardado o fator de segurança. No que diz respeito ao desprendimento da face, deve-se garantir que a tensão de conexão face/reforço ( $T_0$ ) seja menor do que a prevista em projeto e menor do que  $T_{m\acute{a}x}$ . É válido ressaltar que a face não possui papel fundamental na estabilidade interna da massa de solo, ou seja, o equilíbrio global seria possível mesmo na sua ausência (EHRlich, BECKER, 2009), porém para satisfações estéticas e questões relacionadas a instabilidade local é necessário levar em consideração a vinculação face-reforço.

A análise da estabilidade no interior da massa de solo reforçado está diretamente interligada com a redistribuição global das tensões e deformações ocorrentes no maciço. Enquanto o solo está em repouso, não há deformações laterais e, por conseguinte, também não existe a mobilização de tensões nos reforços. A partir do momento em que se permitem as deformações laterais, diminuem-se as tensões horizontais no solo e aumentam-se as tensões de

tração nos reforços, até que o equilíbrio da massa de solo reforçado seja alcançado. Esse ponto de equilíbrio, por sua vez, depende da rigidez relativa solo-reforço ( $S_i$ ) (EHLICH, AZAMBUJA, 2003) (Figura 7). Com reforços mais rígidos o equilíbrio é alcançado sob menores deformações e as tensões mobilizadas nos reforços e no solo são maiores. Já com reforços mais flexíveis o equilíbrio é alcançado sob maiores deformações (EHLICH, AZAMBUJA, 2003). Há de se atentar para que, em casos de solos mais compactos e reforços flexíveis, este ponto pode se encontrar após a ruptura do solo em questão, o que não é desejado.

Figura 7 - Tensão solo- reforço.



Fonte: Benjamin (2006).

Outros fatores também influenciam no comportamento de MSR. A energia de compactação do solo de enchimento gera tensões horizontais residuais provenientes dos ciclos de geração de carga e descarga dos equipamentos de compactação, criando uma espécie de sobreadensamento no solo, o que diminui o ganho de tensões nos reforços decorrentes de carregamentos externos após a construção. Este sobreadensamento só é perceptível até o ponto onde estas tensões horizontais residuais são maiores que aquelas devidas ao peso próprio das camadas de solo acima da cota estudada (EHLICH, AZAMBUJA, 2003).

As características da face, como rigidez, restrição de movimentação da sua base (pé do muro), geometria e inclinação, também têm papel fundamental no comportamento do MSR.

A rigidez da face é apresentada nas formas de rigidez local e rigidez global, sendo esta última subdividida em três tipos: rigidez axial global (forças axiais), rigidez cisalhante global (tensões cisalhantes) e rigidez à flexão global (momentos fletores). É importante ressaltar que o grau de rigidez é característico de cada tipo de face, podendo ser inexistente, baixo, médio ou elevado. Visando uma melhor facilidade construtiva, estética final agradável e maior

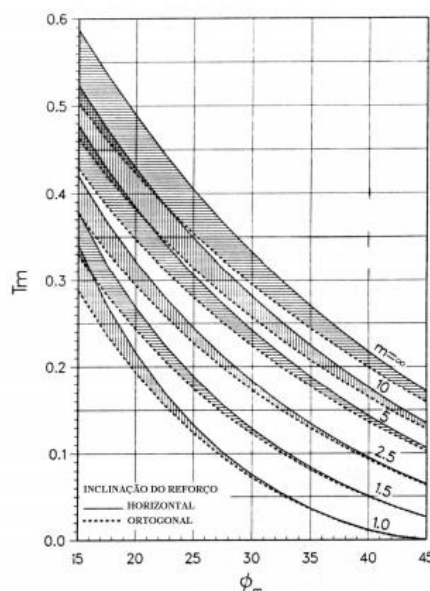
durabilidade, em casos de estruturas permanentes de solo reforçado o uso de faces rígidas é mais usual (OLIVEIRA, 2006).

Em muros de solo reforçado sem restrições de movimentação na base, a rigidez da face não afeta significativamente os valores de  $T_{máx}$ . Já em casos quando a base se encontra restrita e a rigidez da face sai do estado nulo, quanto maior a rigidez da face, maior será a tensão mobilizada na base e menores  $T_{máx}$ . Logo, a rigidez da face sozinha não determina as tensões desenvolvidas nos reforços, mas sim quando analisada em conjunto com a restrição do pé do muro (EHRlich, MIRMORADI, 2013).

Estudos também mostram que a movimentação horizontal do pé do muro tem maior relevância em taludes com inclinações menores do que em inclinações maiores (MIRMORADI, EHRlich E DIEGUEZ, 2016).

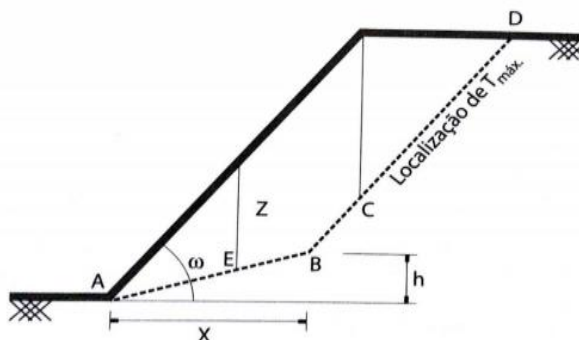
No método Leshchinsky, Boedeker (1989), a relação vertical da inclinação na face ( $m$ ) e o ângulo de atrito do solo ( $\phi_m$ ) são utilizados para a determinação da tensão em cada nível do reforço ( $T_m$ ) por meio de um ábaco (Figura 8). Pode-se perceber que, para um mesmo ângulo de atrito, quanto maior  $m$ , ou seja, quanto mais verticalizada a face, maiores são as tensões previstas.

Figura 8 - Ábaco para determinação da força de tração no reforço.



Fonte: Leshchinsky, Boedeker (1989).

Um fato relevante é que o  $T_{máx}$  não ocorre na base da estrutura em taludes abatidos. Segundo Dantas, Ehrlich (2000), em MSRs íngremes ocorre da seguinte forma: para taludes com inclinação da face ( $\omega$ ) entre  $45^\circ$  e  $65^\circ$ , tem-se que o ponto de atuação do  $T_{máx}$  ocorre em  $x/3$ ; já para inclinação da face ( $\omega$ ) entre  $65^\circ$  e  $90^\circ$  esse ponto ocorre em  $x/2$  (Figura 9).

Figura 9 - Ponto de atuação do  $T_{\text{máx}}$ .

Fonte: Dantas, Ehrlich (2000).

Outro aspecto que influencia a performance do MSR é a geometria da face, que pode ser apresentada de forma planar, mas não se restringe apenas a esse formato, podendo ser também côncava.

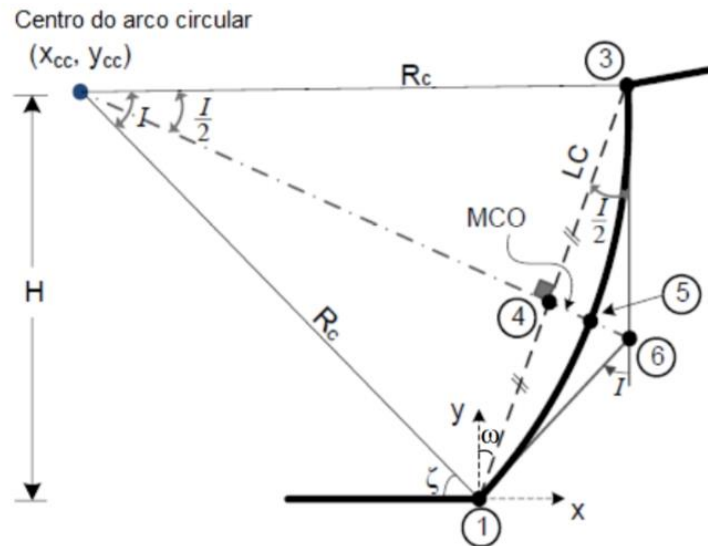
De acordo com Vahedifard, Shahrokhbadi e Leshchinsky (2016), a face côncava gera maior estabilidade no MSR, o que acarreta menores forças de tração no reforço. Foi concluído também que há uma redução de 30% da resistência de tração necessária nos reforços quando analisados em condições estáticas.

Andrade (2019) comparou o comportamento de um muro de face plana com um muro de iguais características e face côncava. A autora também propôs uma face de geometria mista, que começava côncava pela base do muro, se tornando plana no ponto de inflexão, para evitar um talude negativo. Verificou-se que o muro de face côncava apresentou os menores valores de recalque e de deslocamento lateral em relação ao de face plana. No que se refere às  $T_{\text{máx}}$ , o muro de face mista apresentou as tensões de tração desenvolvidas no reforço inferiores às desenvolvidas no muro de face côncava e de face plana.

Soares (2020) comparou muros com diferentes alturas e geometrias de face. O autor concluiu que muros com face côncava apresentam menores deslocamentos laterais e tensões de tração nos reforços quando comparados a muros de face plana, para inclinação de  $5,7^\circ$ . Conforme Soares (2020): “Na ausência de sobrecargas, muros de face côncava ofereceram maiores reduções nas tensões e nos deslocamentos laterais em relação à face plana na altura de 10 m, e, após a aplicação de sobrecargas, as maiores reduções são obtidas na altura de 20 m.”

Vahedifard, Shahrokhbadi e Leshchinsky (2016) descrevem o dimensionamento de um MSR de face côncava com base em um arco circular determinado a partir de um único parâmetro: o *MCO* – *Mid Chord Offset* (Figura 10).

Figura 10 - Centro do arco circular.



Fonte: Adaptado de Vahedifard, Shahrokhbabadi e Leshchinsky (2016).

A determinação do MCO é feita com base na Equação 1:

$$0 \geq MCO \geq \sqrt{1 + \left(\left(\frac{H}{2} - 1\right) \cot \omega - \frac{1}{2} H \tan \omega\right)^2} \frac{1}{2} \sqrt{(H - 2)^2 (\csc \omega)^2} \quad \text{Equação 1}$$

Onde: MCO= *Mid-Chord Offset*

H= altura do muro

$\omega$  = ângulo de inclinação da face do muro em relação a vertical

Determinado o MCO, torna-se possível encontrar o raio do arco circular, calculado de acordo com a Equação 2:

$$R_c = \frac{H^2}{8MCO} (1 + \tan^2 \omega) + \frac{MCO}{2} \quad \text{Equação 2}$$

Já o ângulo I é calculado de acordo com a Equação 3:

$$I = 4 \tan^{-1} \left( \frac{2 MCO \cos \omega}{H} \right) \quad \text{Equação 3}$$

É possível também calcular o ângulo existente entre o pé da estrutura e raio da seção circular por meio da Equação 4:

$$\zeta = \omega + \frac{I}{2} \quad \text{Equação 4}$$

Seguindo a metodologia, após determinar essas variáveis, determina-se as coordenadas do centro do arco circular ( $x_{cc}, y_{cc}$ ) por meio das Equações 5 e 6:

$$X_{cc} = -R_c \cos \zeta \quad \text{Equação 5}$$

$$Y_{cc} = R_c \sen \zeta \quad \text{Equação 6}$$

Por fim, é possível calcular as coordenadas de qualquer ponto da face do MSR de face côncava com base na Equação 7.

$$y = y_{cc} - \sqrt{R_c^2 - (x - x_{cc})^2} \quad \text{Equação 7}$$

### 2.3 Métodos numéricos

Os métodos numéricos são ferramentas que, por meio de algoritmos, usam equações aritméticas na resolução dos problemas, e vêm sendo amplamente utilizados pelos profissionais da área. Essa metodologia está atrelada à tecnologia, ou seja, é executada por meio de programas computacionais, gerando ainda maior popularidade entre os usuários. Dentro da engenharia, os métodos numéricos mais utilizados são o Método dos Volumes Finitos, Método dos Elementos de Contorno, Método dos Elementos Discretos e o Método dos Elementos Finitos, metodologia utilizada no presente trabalho.

O Método dos Elementos Finitos (*FEM – Finit Element Model*) tem sido utilizado desde o fim da segunda guerra mundial para tratar problemas de geometrias e carregamentos complexos e atua na geração de resultados relacionados, por exemplo, à determinação de deslocamentos, deformações e tensões e análises de materiais quanto as suas resistência e rigidez. Com base em um domínio contínuo, que é dividido em pequenos corpos denominados elementos finitos conectados por pontos denominados nós, geram-se resultados do problema inicial. Os algoritmos utilizados apresentam resultados aproximados por meio de uma sucessão de iterações. Apesar de aproximados os resultados são confiáveis e aptos para serem utilizados, devido à minimização dos erros de aproximação ao longo das iterações e com o aumento do número de elementos e de nós.

Dentro da geotecnia, diversos programas computacionais utilizam o Método dos Elementos Finitos para resolver problemas, como o Plaxis, RocScience, GeoStudio. Tais programas, com base em dados de entrada característicos de cada estrutura, como no caso de MSR, a geometria da face, tipo de solo, rigidez dos reforços, faceamento, entre outras características, gera resultados completos a respeito do seu comportamento em diferentes condições de trabalho, como por exemplo, na variação nas condições de carregamento.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Geometria dos muros

Foram feitas seis modelagens numéricas de muros de solo reforçado com 10 metros de altura, faceamento do tipo autoenvelopado e reforço em geogrelha. Essas modelagens foram divididas em dois grupos: face plana (Grupo P) e face côncava (Grupo C). Em ambos os grupos, foram utilizados para os modelos diferentes ângulos de inclinação da face com a vertical (H/V): 1/1,25, 1/2,5 e 1/10, aproximadamente, 38,65°, 21,80° e 5,71° respectivamente. Os muros foram nomeados conforme o tipo de face e sua inclinação (Tabela 1).

Tabela 1 - Características das modelagens numéricas.

<b>Tipo de face</b>	<b>Inclinação da face</b>	<b>Muro</b>
Plana	1/1,25	P 1/1,25
	1/2,5	P 1/2,5
	1/10	P 1/10
Côncava	1/1,25	C 1/1,25
	1/2,5	C 1/2,5
	1/10	C 1/10

Fonte: Da autora (2021).

Os formatos das faces côncavas foram estabelecidos conforme metodologia de Vahedifard, Shahrokhbadi e Leshchinsky (2016). Primeiramente foi calculado o *MCO* e em seguida outros parâmetros fundamentais já citados. Esse processo foi feito para cada uma das três modelagens, e os parâmetros podem ser vistos na Tabela 2. Após essa etapa foi possível calcular todas as coordenadas de cada ponto das faces dos muros côncavos.

Tabela 2 - Parâmetros dos muros de face côncava.

<b>Parâmetros</b>	<b>C1/1,25</b>	<b>C 1/2,5</b>	<b>C 1/10</b>
MCO (m)	2,652	1,271	0,313
Rc (m)	9,055	12,042	40,512
I (°)	90,000	53,130	14,250
ζ (°)	83,659	48,367	12,836
X <sub>cc</sub> (m)	-1,000	-8,000	-39,500
Y <sub>cc</sub> (m)	9,000	9,000	9,000

Fonte: Da autora (2021).

As camadas de solo lançado possuíam 0,20 metros, sendo o espaçamento vertical entre reforços de duas camadas (0,40 metros). Adotou-se reforços com comprimento de 7,5 metros o que corresponde a 75% da altura do muro e modelos com comprimento total de 170% da altura

do muro a partir do topo (Ehrlich, Becker, 2009). As geometrias de todos os muros podem ser observadas na Figura 11.

#### a. *Inputs*

- (a) Solo de enchimento. O solo em questão é uma areia hidrófoba caracterizada e ensaiada no Laboratório de Geotecnia da UFRJ/COPPE. Os parâmetros de caracterização e resistência (Tabela 3) foram disponibilizados pela equipe de pesquisa. Foi empregado o modelo constitutivo *Hardenig Soil* para representar esta areia. Neste modelo elasto-plástico, a rigidez do solo varia de acordo com a tensão confinante.

Tabela 3 - Características geotécnicas do solo utilizado.

Parâmetros geotécnicos do solo	Nomenclatura	Valor
Peso específico do solo não-saturado (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{\text{unsat}}$	19,25
Coesão (kN/m <sup>2</sup> )	c	1
Ângulo de atrito (°)	$\phi$	50
Coefficiente de Poisson	$\nu$	0,25
Razão de ruptura	$R_f$	0,7
Módulo de rigidez no carregamento (kN/m <sup>2</sup> )	$E_{50}^{\text{ref}}$	$4,25 \times 10^4$
Módulo de rigidez volumétrico (kN/m <sup>2</sup> )	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$	$3,177 \times 10^4$
Módulo de rigidez de descarga-recarga (kN/m <sup>2</sup> )	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	$1,323 \times 10^5$

Fonte: Da autora (2021).

- (b) Face e reforço: Os parâmetros de resistência do reforço foram fornecidos pelo fabricante. O faceamento foi modelado numericamente por meio de um elemento “placa”, pois o elemento “grelha” possui apenas resistência axial. Sua resistência axial foi estimada em 10% daquela do reforço (Tabela 4).

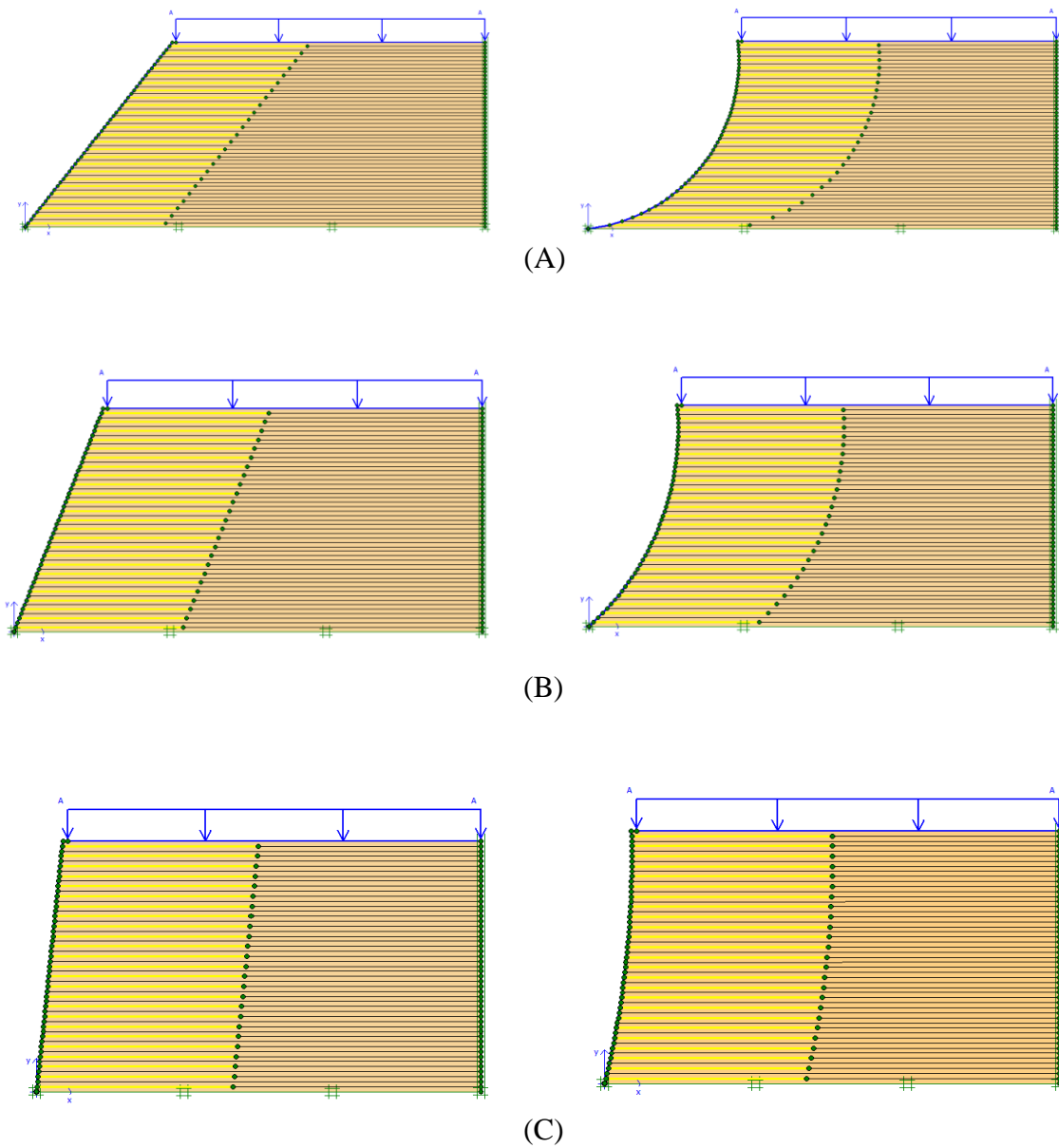
Tabela 4 - Características do faceamento e do reforço.

Parâmetro do material	Valor
<b>Face</b>	
Rigidez axial elástica (kN/m)	60
Rigidez à flexão plástica (kN.m <sup>2</sup> /m)	1
<b>Reforço</b>	
Rigidez axial elástica (kN/m)	600

Fonte: Da autora (2021).



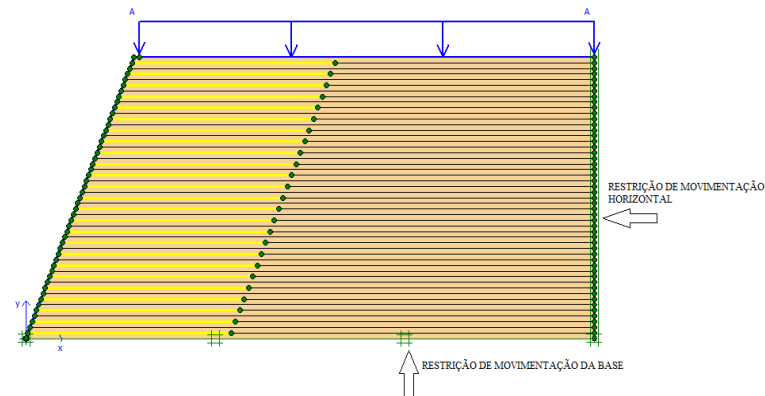
Figura 11 - Perfis do muro de faces plana e cônica com inclinações: (A)- 1/1,25; (B) 1/2,5 e (C)1/10.



Fonte: Da autora (2021).

- (c) Restrições: Foi considerada a total restrição da movimentação da base do muro e restrição horizontal nas laterais do modelo adjacentes à massa não reforçada (Figura 12).

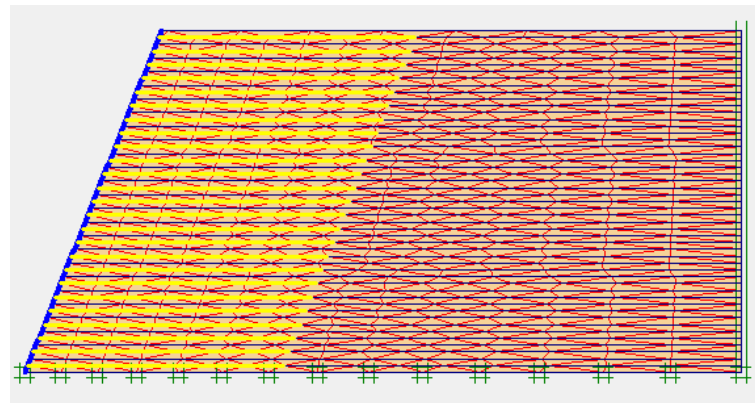
Figura 12 - Restrições de movimentação aplicadas nos modelos.



Fonte: Da autora (2021).

- (d) Malha: Foi gerada malha com elementos triangulares, seis nós por elemento e refinamento grosseiro (Figura 13). O estudo de malha necessário a essa definição foi feito previamente pelo grupo de pesquisa (ANDRADE, 2019; SOARES, 2020)

Figura 13 – Malha gerada na análise.

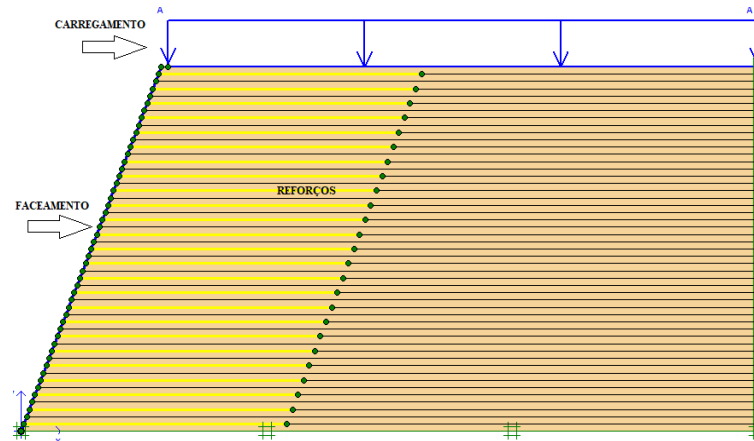


Fonte: Da autora (2021).

## b. Etapas construtivas e de carregamento

Os modelos foram desenhados, os parâmetros de cada material foram definidos e associados aos elementos geométricos. Impôs-se um carregamento linear distribuído na superfície de todo o muro, com afastamento de 0,20 metros da face para evitar instabilidades locais (Figura 14). Ao final, a malha foi gerada e passou-se para a etapa da construção numérica do modelo.

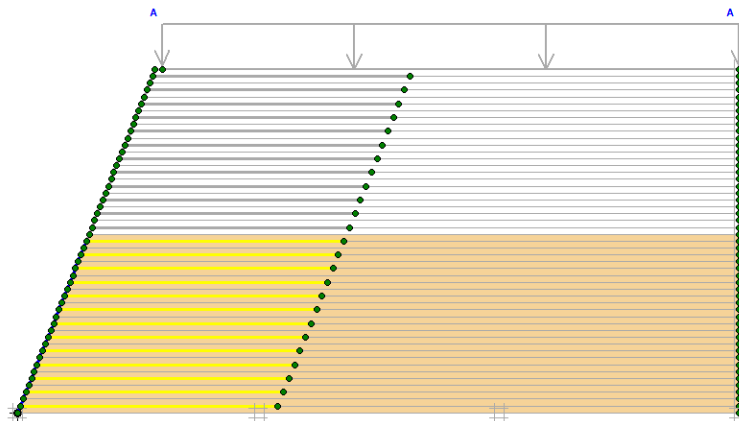
Figura 14 - Detalhes construtivos dos modelos.



Fonte: Da autora (2021).

Foram criadas 50 fases de cálculo. Em cada uma delas foram ativadas sequencialmente a camada de solo, o faceamento e o reforço quando este se encontrava na parte superior da camada de solo em questão (Figura 15). As restrições de movimentação lateral eram ativadas automaticamente pelo próprio programa.

Figura 15 - Criação e habilitação das fases dos modelos.



Fonte: Da autora (2021).

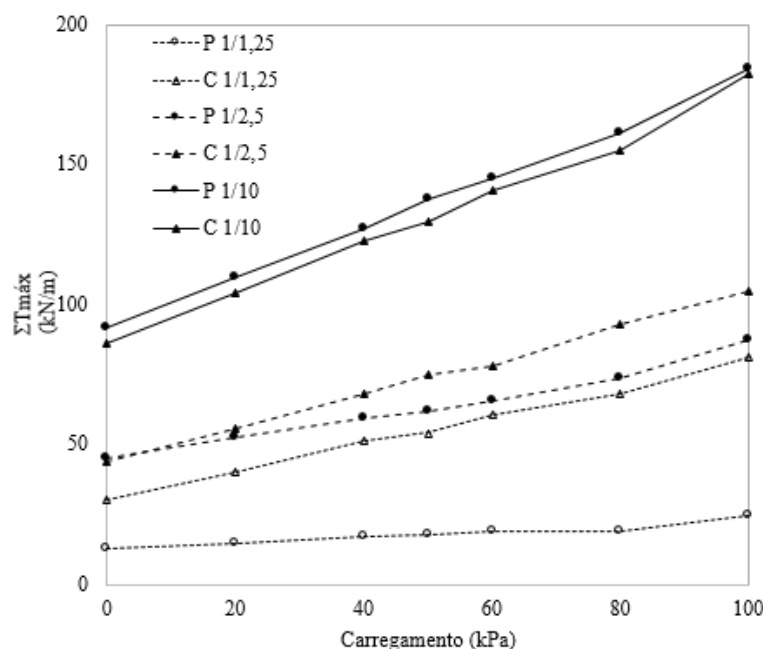
Por último, o carregamento foi ativado em 7 fases de cálculo, iniciando-se na fase de final de construção (0 kPa), aumentando-se gradativamente o módulo da carga para 20, 40, 50, 60, 80 e 100 kPa.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Tensões máximas de tração desenvolvidas nos reforços ( $T_{m\acute{a}x}$ )

No presente trabalho, foram identificadas as tensões de tração máxima ( $T_{m\acute{a}x}$ ) em todos os reforços de cada um dos seis modelos analisados. Essas tensões foram analisadas considerando as seguintes etapas do carregamento: 0, 20, 40, 50, 60, 80 e 100 kPa. Em seguida, realizou-se o somatório destas tensões ( $\Sigma T_{m\acute{a}x}$ ) (Figura 16).

Figura 16 - Somatório das tensões máximas de tração no reforço com carregamento.



Fonte: Da autora (2021).

Na fase final da construção (FdC – 0 kPa), o muro P 1/10 apresentou  $\Sigma T_{m\acute{a}x}$  7% maior que o muro C 1/10, já em 100 kPa essa porcentagem cai para 1%. O muro P 1/2,5, apresentou  $\Sigma T_{m\acute{a}x}$  2% maior que o muro C 1/2,5 ao FdC, porém a 100 kPa houve uma inversão e o muro C 1/2,5 apresentou  $\Sigma T_{m\acute{a}x}$  20% maior que o muro P 1/2,5. O muro C 1/1,25 apresentou  $\Sigma T_{m\acute{a}x}$  58% maior que o muro P 1/1,25 ao FdC e 234% maior a 100 kPa. Essas informações foram resumidas na Tabela 5.

Tabela 5 - Diferença do  $\Sigma T_{m\acute{a}x}$  entre o muro de face côncava e de face plana.

Inclinação da face	Carregamento (kPa)	
	0	100
1/10	-7%	-1%
1/2,5	-2%	20%
1/1,25	58%	234%

Fonte: Da autora (2021).

Nota-se que quanto menos inclinada a face do muro, menor a diferença do  $\sum T_{\text{máx}}$  entre o muro de face côncava e o de face plana para todos os estágios de carregamento. No muro com menor inclinação, a face côncava apresenta menor  $\sum T_{\text{máx}}$  que o muro de face plana. Porém, nos muros mais inclinados ocorre o contrário. Logo, para muros de mesma altura onde está sendo aplicado o mesmo tipo de carregamento, é possível dizer que muros com maior inclinação e faceamento côncavo desenvolverão maiores tensões máximas, o que pode encarecer o projeto.

Já quando se comparam muros com o mesmo tipo de face a 100 kPa (Tabela 6), é possível perceber que, com a face plana, a diferença do  $\sum T_{\text{máx}}$  entre os muros de distintas inclinações da face é maior do que essa mesma diferença  $\sum T_{\text{máx}}$  nos muros de face côncava. Em outras palavras, a face côncava uniformiza o comportamento dos MSRs com diferentes inclinações de face.

Tabela 6 - Comparação do  $\sum T_{\text{máx}}$  entre muros de diferentes inclinações.

	<b>Face plana</b>	<b>Face côncava</b>
1/1,25 para 1/2,5	258%	29%
1/1,25 para 1/10	656%	124%

Fonte: Da autora (2021).

A evolução de  $\sum T_{\text{máx}}$  com o carregamento foi analisada por meio da inclinação de uma reta que liga os pontos de 0 e 100 kPa (Tabela 7). É possível perceber que os muros de face plana possuem menor variação do  $\sum T_{\text{máx}}$  com o carregamento; já o muro de face côncava possui uma maior variação com o carregamento, independentemente da inclinação da face. Em faces mais inclinadas, esse aumento tem maior relevância. Esse aspecto tem importância para projetos de muros que serão submetidos a carregamentos externos.

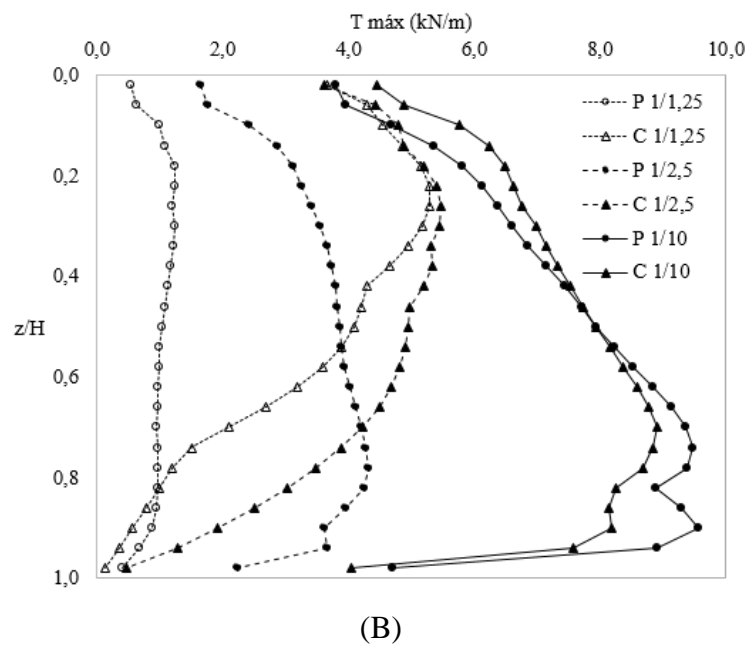
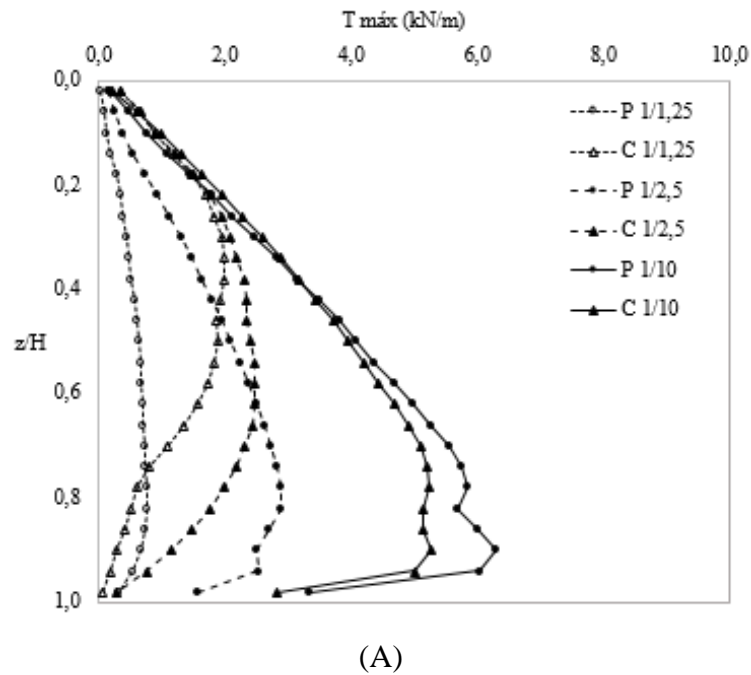
Tabela 7 - Inclinação da reta.

<b>Inclinação da face</b>	<b>Face plana</b>	<b>Face côncava</b>
1/10	101%	112%
1/2,5	95%	139%
1/1,25	91%	170%

Fonte: Da autora (2021).

Foram analisadas, também, as tensões máximas nos reforços relacionadas com as suas profundidades de instalação em relação ao topo do muro (z) para o final de construção (Figura 17-A) e final de carregamento (Figura 17-B).

Figura 17 - Tensão máxima no reforço x Profundidade do reforço: (A) 0 kPa e (B) 100 kPa.



Fonte: Da autora (2021).

No FdC, o comportamento do  $T_{máx}$  em muros de face plana é mais linearizado do que em faces côncavas. Para muros mais verticais, a diferença entre geometrias de face é menos significativa. Já nos muros de face côncava, para baixas profundidades ( $\approx 0,2 z/H$ ) percebe-se que o a inclinação da face não interfere significativamente nos valores de  $T_{máx}$ . Contudo, para maiores profundidades a diferença entre o  $T_{máx}$  dos muros de diferentes inclinações da face é notória.

Analisando-se os muros mais inclinados (1/1,25), é possível perceber que o muro de face plana apresenta tensões de valores mais baixos e mais homogêneos com a profundidade do que o muro de face côncava. Em questões de projetos de muros de face côncava inclinada, a adoção de um mesmo reforço que atenda todos os quesitos de dimensionamento em toda a altura do muro acarretaria o superdimensionamento dos reforços em alguns pontos da estrutura, o que impacta no custo total.

A 100 kPa, os muros de face plana com maiores inclinações da face apresentam um comportamento uniforme das tensões desenvolvidas com o aumento da profundidade, ou seja, elas aumentam próximo ao topo do muro, porém com o aumento da profundidade ( $z/H \approx 0,1$ ) essas tensões tendem a não sofrer grandes variações até próximo a base do muro, onde diminuem. Já o muro P 1/10, também sofre esse aumento de tensões próximo ao topo, contudo o acréscimo de tensão continua crescente com o aumento da profundidade e só diminui próximo a base da estrutura. Sendo assim, nesta condição, devido ao comportamento dos muros de face plana mais abatidos ser uniforme tem-se a possibilidade de menores custos em obra em relação ao muro de face plana mais verticalizada.

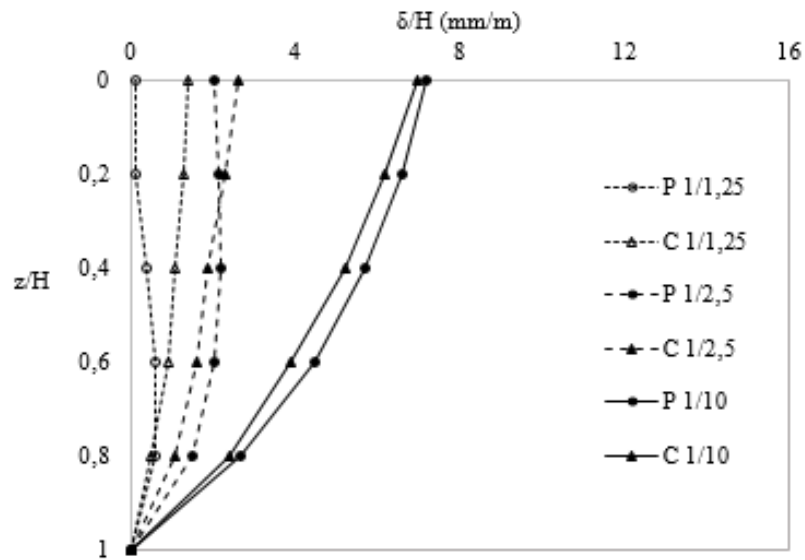
Em relação ao comportamento dos muros côncavos, tem-se que os muros mais abatidos apresentam aumento das tensões próximo ao topo do muro, porém essas tensões diminuem de forma notória com o aumento da profundidade, levando assim a um comportamento não uniforme das tensões com a profundidade. Já no muro mais verticalizado, o comportamento do muro de face côncava é caracterizado pelo aumento das tensões acompanhar o aumento da profundidade do muro quase linearmente e só diminuir próximo a base da estrutura.

Sendo assim, ao se optar pelo uso de um muro de face mais abatida, tanto para final de construção quanto para final de carregamento, o muro de face plana tende a gerar menores gastos em obra que o muro de face côncava devido ao seu comportamento mais uniforme. Já ao se optar pelo muro mais verticalizado, mesmo com o comportamento das tensões semelhantes para ambas as geometrias de face, no geral, o muro côncavo apresenta menor valor máximo de  $T_{\text{máx}}$  que o mesmo muro de face plana.

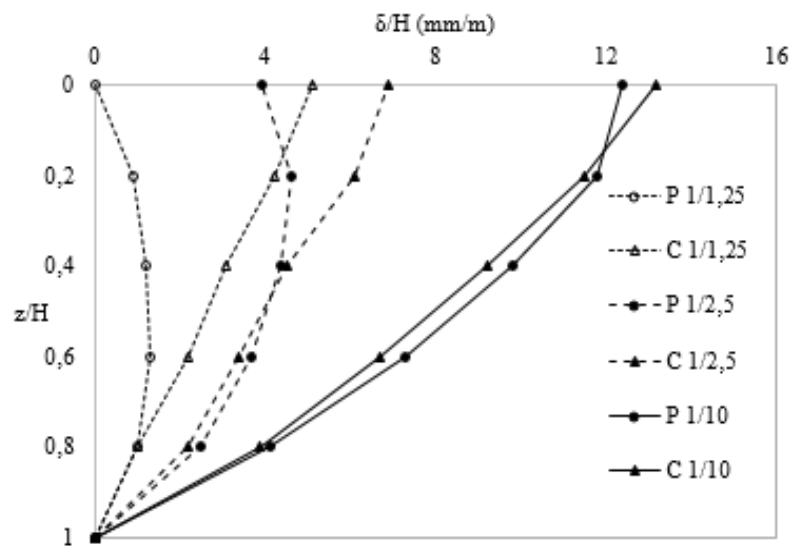
## 4.2 Deslocamentos horizontais

Os deslocamentos horizontais ( $\delta$ ) sofridos pelos modelos foram analisados nas situações de final de construção (Figura 18-A) e final de carregamento (Figura 18-B). Foram pré-determinados valores para  $z$  (0, 2, 4, 6, 8 e 10 metros) de modo a compreender os deslocamentos horizontais em toda a altura dos modelos.

Figura 18 - Deslocamentos horizontais: (A) 0 kPa e (B) 100 kPa.



(A)



(B)

Fonte: Da autora (2021).

Para FdC, tem-se que o muro P 1/1,25 apresentou um deslocamento semelhante ao muro C 1/1,25 próximo a base do muro, porém com o aumento da altura do muro nota-se que o muro plano passa a sofrer deformações menores que o muro côncavo. Esse comportamento também se aplica aos muros P 1/2,5 e C 1/2,5, porém para essa inclinação o muro plano passa a sofrer menores deformações a partir de um ponto mais alto que no muro de inclinação 1/1,25. Já no modelo menos abatido, o muro P 1/10 tende a sofrer maiores deformações durante toda a



análise. Contudo, as diferenças entre C 1/10 e P 1/10 são menos significativas do que nas demais inclinações (até 15,38% para 1/10, enquanto a maior diferença foi de 1300% para 1/1,25).

Ao final de carregamento (Figura 18-B), nota-se que em todos os casos os muros de face côncava se deslocaram mais na parte superior quando comparados com os muros de face plana, o que pode ser resultado de uma parcela de inclinação negativa gerada a partir da concavidade. Este comportamento já havia sido observado em estudos anteriores (ANDRADE, 201; SOARES, 2020). É válido ressaltar que o comportamento do deslocamento horizontal nos muros de mesma inclinação se apresenta de forma semelhante até este ponto de transição, onde os muros de face plana apresentam menores deslocamentos; quanto mais verticalizada é a face da estrutura mais perto do topo do muro é este ponto.

Tanto para a situação de final de construção (0 kPa) quanto para a final de carregamento (100 kPa), foram calculados os deslocamentos médios em toda a altura do muro (Tabela 8).

Tabela 8 - Média dos deslocamentos horizontais (0 kPa).

Muro	Tipo de face	Média dos deslocamentos (mm/m)	
		(0 kPa)	(100 kPa)
P 1/1,25	Plana	0,30	0,73
P 1/2,5		1,66	3,17
P 1/10		4,45	7,56
C 1/1,25	Côncava	0,86	2,60
C 1/2,5		1,58	3,85
C 1/10		4,11	7,41

Fonte: Da autora (2021).

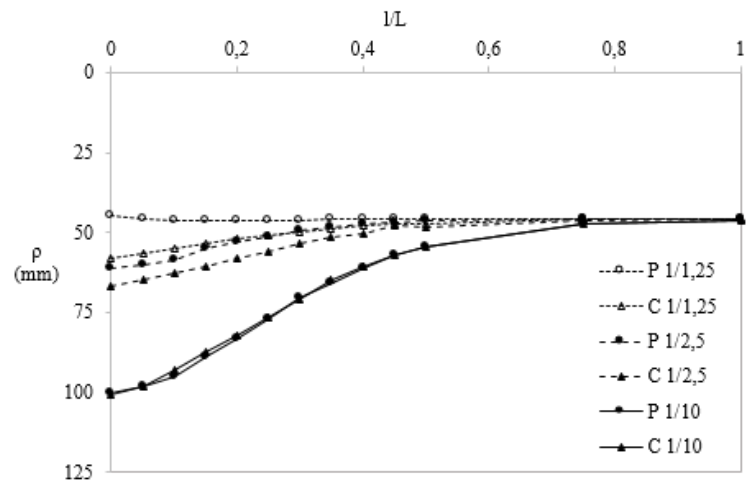
Pode-se perceber que ao se comparar muros de mesma geometria da face, quanto mais abatida for a face do muro, menores serão os deslocamentos horizontais médios que irão ocorrer na estrutura, tanto ao FdC quanto ao final do carregamento. Tal fato justifica a ocorrência de menores tensões mobilizadas nos reforços nessas situações. Também é possível corroborar que quanto mais abatida a face, mais os muros de face côncava se deslocam em relação aos de face plana.

#### 4.3 Deslocamentos verticais

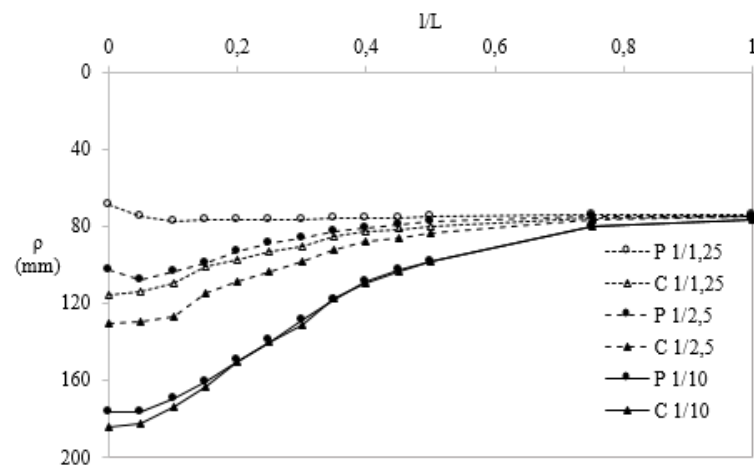
Os deslocamentos verticais sofridos pelos modelos também foram analisados ao final da construção (FIGURA 19-A) e ao final do carregamento (FIGURA 19-B), onde “*l*” representa a distância entre a crista do muro (variável) e o ponto analisado na parte superior da estrutura,

$L$  é o comprimento total do muro (também variável) e  $\rho$  representa o deslocamento vertical sofrido. Os valores de  $l$  foram pré-determinados de modo a representarem sempre a mesma proporção em relação aos diferentes  $L$ s dos modelos.

Figura 19 - Deslocamentos verticais: (A) 0 kPa e (B) 100 kPa.



(A)



(B)

Fonte: Da autora (2021).

Ao final de construção, nota-se que o deslocamento vertical diminui à medida em que se aumenta o afastamento da face. Percebe-se também que nos muros de faces mais abatidas, a face plana apresenta menores deformações que a face côncava. No muro mais verticalizado o comportamento é semelhante para as duas geometrias da face. É importante ressaltar que tanto para a face côncava quanto para a plana, os muros mais abatidos indicam menores valores de deslocamento vertical em relação ao muro mais verticalizado, corroborando os resultados de deslocamentos horizontais e tensões de tração nos reforços ao final de construção.

Já ao final do carregamento, é notório que os muros de face plana mais abatidas apresentam maiores deslocamentos verticais nas proximidades da face e, em seguida, com o aumento da distância da face esses deslocamentos se estabilizam. Nos muros mais abatidos de face côncava, os maiores deslocamentos ocorrem na face. Já no muro mais verticalizado, para ambas as geometrias de face, os deslocamentos verticais tendem a diminuir com o distanciamento da face.

Sendo assim, para as duas situações (final de construção e final de carregamento), os deslocamentos verticais no muro verticalizado são maiores que nos muros mais abatidos o que justifica as maiores tensões desenvolvidas nos muros mais verticais.

Por fim pode-se observar que quanto maior o distanciamento da face menos relevante são as características da face (geometria e inclinação) visto que todos os muros começam a apresentar comportamento semelhante a partir de  $l/L \approx 0,7$ .

## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como finalidade melhorar o entendimento sobre o comportamento de MSRs de face côncava, estudando a influência da inclinação da face por meio da análise numérica.

As principais observações deste trabalho são:

- Para muros com maiores inclinações da face, a face plana mobiliza menos os reforços. Já para muros com menores inclinações da face, a face côncava é quem mobiliza menos os reforços, contudo a diferença não é significativa.
- Em situações de carregamento muros planos de face mais abatida apresentam um comportamento homogêneo da mobilização de tensões nos reforços com a profundidade, porém esses mesmos muros de face côncava apresentam um comportamento não-homogêneo na distribuição de tensões. Sendo assim, para o muro de face mais abatida a face plana possibilita menores chances de superdimensionamento, ou seja, diminuição de gastos na obra. Já no muro de face mais verticalizada, o comportamento para as duas geometrias de face é semelhante, porém o muro de face côncava é quem tem um comportamento mais homogêneo que o muro de face plana.
- As maiores deformações horizontais ocorrem nos muros de face côncava e, nesses muros, essas deformações se manifestam em maior módulo nas proximidades do topo do muro. Tem-se também que quanto mais verticalizada é a face da estrutura, mais semelhante é o comportamento dos muros de face côncava e plana.
- Os maiores módulos de deformação vertical se manifestam próximo a face dos modelos. Para os deslocamentos verticais, os muros mais abatidos apresentam maiores deslocamentos na face côncava e no muro mais verticalizado a variação da geometria da face não interfere de forma significativa nos deslocamentos.
- Tanto deslocamentos verticais como horizontais nos muros de faces mais verticalizadas justificam as maiores tensões desenvolvidas nos reforços.
- Para condições de carregamento, muros de face côncava mais abatidas apresentam maiores mobilizações das tensões nos reforços e maiores deslocamentos do que esses mesmos muros de face plana. Assim como, apresentam um comportamento das tensões em relação a profundidade não-uniforme.

### **5.1 Sugestões de trabalhos**

Com base no presente estudo, sugere-se variar a rigidez dos reforços empregados nos modelos, bem como o tipo de faceamento, visando aumentar o entendimento sobre o comportamento dos MSRs com face côncava. Outra abordagem interessante seria entender a influência da rigidez da fundação em MSRs.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, M. P. **Estudo Numérico Comparativo do Comportamento de Muros de Solo Reforçado com Diferentes Geometrias de Face**. 2019. 44 p. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2019.

BENJAMIM, C.V.S. **Avaliação experimental de protótipos de estruturas de contenção em solo reforçado com geotêxtil**. 2006. 278 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos/Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

DANTAS, B. T.; EHRLICH, M. Método de análise de taludes reforçados sob condições de trabalho. **Solos e Rochas**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 2, 2000a.

DANTAS, B. T. 2004. **Análise do Comportamento de Estruturas de Solo Reforçado sob Condições de Trabalho**. Tese (Doutorado) - Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

EHRLICH, M.; AZAMBUJA, E. **Muros de solo reforçado**. In: Simpósio Brasileiro de Geossintéticos, 4º, 2003, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: Geossintéticos, 2003.

EHRLICH, M; BECKER, L. **Muros e taludes de solo reforçado: projeto e execução**. 1º ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

EHRLICH, M., MIRMORADI, S. H. Evaluation of the Effects of Facing Stiffness and Toe Resistance on the Behavior of GRS Walls. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 40 (Out), p. 28-36, 2013.

**GEOGRELHA**. Disponível em: < <https://www.diprotec.com.br/produto/Geogrelhas>> Acesso em: 01 fev. 2021.

**GEOTÊXTEL NÃO-TECIDO**. Disponível em: <<https://www.archiexpo.com/pt/fabricante-arquitetura-design/geotextil-polipropileno-34233.html>> Acesso em: 01 fev. 2021.

**GEOTÊXTEL TECIDO**. Disponível em: <<https://www.archiexpo.com/pt/prod/tencate/product-59331-407600.html>> Acesso em: 01 fev. 2021.

HOLLAWAY, L.C.; HEAD, P.R. **Advanced Polymer Composites and Polymers in the Civil Infrastructure**. Amsterdam: Elsevier Science, 2001.

LESHCHINSKY, D.; BOEDEKER, R. H. Geosynthetic reinforced soil structures. **Journal of Geotechnical Engineering**, Vol. 115, n. 10, 1989.

MIRMORADI, S.H.; EHRLICH, M.; DIEGUEZ, C., 2016, “Evaluation of the combined effect of toe resistance and facing inclination on the behavior of GRS walls”. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 44, p. 287-294.

**MURO DE SOLO REFORÇADO COM FACEAMENTO AUTOENVELOPADO.**

Disponível em: <<https://www.diprotec.com.br/solucao/contencoes-em-solo-reforcado/>>

Acesso em: 01 fev. 2021.

**MURO DE SOLO REFORÇADO COM FACEAMENTO EM BLOCOS**

**SEGMENTADOS.** Disponível em: <<http://www.muroarmado.com.br/solo-reforcado-tipo-petalude.html>>

Acesso em: 01 fev. 2021.

**MURO DE SOLO REFORÇADO COM FACEAMENTO EM PLACAS DE**

**CONCRETO.** Disponível em: <<https://www.diprotec.com.br/solucao/contencoes-em-solo-reforcado/>>

Acesso em: 01 fev. 2021.

OLIVEIRA, G. A. **Verificação da Influência do Reforço em Muros de Solo Reforçado Através de Modelos Físicos.** 2006. 166 p. Tese (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE, Rio de Janeiro, 2006.

SOARES, M. A. S. **Análise numérica do comportamento de muros de solo reforçado de faces plana e côncava com diferentes alturas.** 2020. 46 p. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2020.

SOCIEDADE ALEMÃ DE GEOTECNIA. **Recommendations for Design and Analyses of**

**Earth structures using geosynthetic reinforcements – EBGEO.** Tradução de Alan Johnson.

2 ed. Alemanha, 2011.

VAHEDIFARD, F.; SHAHROKHABADI, S.; LESHCHINSKY, D. Geosynthetic-reinforced soil structures with concave facing profile. **Geotextiles and Geomembranes**, Vol. 44, p. 358-365, 2016.

VIDAL, H. The principles of reinforced earth. **Highway Research Record**, Vol. 282, p. 1-16, 1969.