

# Comparação de métodos empíricos e numéricos no dimensionamento de muros de solos reforçados com geossintéticos

Mariana da Costa

Graduado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, [mariana.costa@gwsengenharia.com.br](mailto:mariana.costa@gwsengenharia.com.br)

Maria Isabel Martínez López

Discente de Doutorado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, [maria.lopez@aluno.ufop.edu.br](mailto:maria.lopez@aluno.ufop.edu.br)

Lucas Deleon Ferreira

Professor, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, [lucas@ufop.edu.br](mailto:lucas@ufop.edu.br)

**RESUMO:** Existem diversos métodos empíricos para dimensionamento de muros de solos reforçados com geossintéticos (MSRG). O comportamento destas estruturas pode ser simulado utilizando-se software de elementos finitos para análise de tensões mobilizadas nos reforços e estimativa de deslocamentos. Este estudo propõe-se apresentar análises de MSRG avaliando a influência da geometria e da rigidez dos reforços mediante a comparação de resultados obtidos em simulações por métodos empíricos e por modelagem numérica. Assim realizou-se o pré-dimensionamento pelo método de Ehrlich e Mitchell (1994), obtendo-se os valores de tensão máxima e comprimento de reforços, o pré-dimensionamento foi utilizado para a análise de modelagem numérica utilizando-se o software Plaxis 2D, em que são obtidos valores de tensão máxima e deslocamentos nos reforços, bem como o deslocamento total. As variáveis analisadas foram a tensão máxima mobilizada nos reforços, e a influência da rigidez dos reforços nos deslocamentos estimados. Para tanto foram estabelecidos muros com variações de altura, construídos com o mesmo tipo de solo e inclinação da face, assim como espaçamentos vertical e comprimentos dos reforços constantes em todas as camadas. Verificou-se que o aumento da altura dos muros impacta em maiores valores de tensões e deslocamentos, tem-se ainda que o aumento da rigidez resulta em menores valores de deslocamento nos reforços e da estrutura. Os valores de tensão obtidos pela modelagem numérica foram superiores aos obtidos pelos métodos empíricos. Os resultados corroboram com outros resultados encontrados na literatura. Conclui-se que a análise por métodos empíricos fornece valores adequados de tensão, entretanto a análise por modelagem numérica se faz essencial para verificação de deslocamentos da estrutura.

**PALAVRAS-CHAVE:** Solo reforçado, Modelagem numérica, Geossintéticos

**ABSTRACT:** There are several empirical methods for designing soil walls reinforced with geosynthetics (MSRG). The behavior of these structures can be simulated using finite element software to analyze the stresses mobilized in the reinforcements and estimate displacements. This study proposes to present MSRG analyzes evaluating the influence of geometry and stiffness of reinforcements by comparing results obtained in simulations using empirical methods and numerical modeling. Thus, pre-sizing was carried out using the method of Ehrlich and Mitchell (1994), obtaining the values of maximum tension and length of reinforcements. The pre-sizing was used for numerical modeling analysis using the Plaxis 2D software. , in which maximum stress values and displacements in the reinforcements are obtained, as well as the total displacement. The variables analyzed were the maximum tension mobilized in the reinforcements, and the influence of the stiffness of the reinforcements on the estimated displacements. To this end, walls with varying heights were established, built with the same type of soil and slope of the face, as well as constant vertical spacing and lengths of reinforcements in all layers. It was found that increasing the height of the walls results in higher values of tension and displacement, and that the increase in stiffness results in lower values of displacement in the reinforcements and structure. The stress values obtained by numerical modeling were higher than those obtained by empirical methods. The results corroborate other results found in the literature. It is concluded that analysis using empirical methods provides adequate stress values, however analysis using numerical modeling is essential for verifying displacements of the structure.

**KEYWORDS:** Reinforced Soil, Numerical modeling, Geosynthetic.

## 1 INTRODUÇÃO

Os MSR são muros de gravidade em que o material de construção da estrutura é constituído de solo compactado e inclusões resistentes à tração (EHRlich & BECKER, 2020). Com a compactação, o solo torna-se um material mais resistente à compressão e ao cisalhamento, além de menos deformável. Já a inclusão de reforços proporciona resistência à tração ao conjunto solo-reforço, visto que solos são deficientes quanto a essa resistência (MIRMORADI & EHRlich, 2014). Os benefícios decorrentes da utilização de MSR incluem a estabilidade global e local da estrutura, o aumento da viabilidade de construção do aterro e a redução de custo em determinados casos. A utilização de geossintéticos é uma maneira útil de reduzir custos de implantação da estrutura, ao viabilizar obras maiores devido às elevadas resistências à tração, à durabilidade e à variedade de opções. Contudo, a análise de estabilidade de muros de solos reforçados com geossintéticos (MSRG) apresenta complexidades (GONÇALVES, 2016).

O comportamento de MSRG pode ser estudado com a utilização de programas computacionais de elementos finitos, a fim de se obter configurações mais econômicas. O desenvolvimento tecnológico das últimas décadas evidenciou a importância de se considerar simulações numéricas em estruturas que tenham interação solo-estrutura. Para o presente estudo, o programa Plaxis 2D será aplicado para comparar as máximas trações mobilizadas nos reforços obtidas a partir de métodos empíricos com as fornecidas por métodos numéricos, e, assim, identificar condições mais reais, bem como avaliar o deslocamento máximo da face dos muros. As análises permitem também verificar a análise de estabilidade interna e externa da estrutura.

O trabalho de Dantas & Ehrlich (2000) desenvolveu um método analítico fechado para o dimensionamento interno das estruturas de solo reforçado de inclinação qualquer. Esse segue procedimentos de determinação da tensão vertical conforme a posição dos pontos das trações máximas. Comparou-se os resultados com análises numéricas e essa mostrou a boa capacidade de previsão do método, que usa equações ou ábacos. O estudo mostrou a importância da compactação e da rigidez relativa solo-reforço na análise de projetos destas estruturas.

Gonçalves (2016), em seu estudo, simulou MSRG no software Plaxis analisando-se como parâmetros o deslocamento máximo da face e a máxima força mobilizada no reforço. Para análise, inicialmente foi calibrado um modelo numérico a partir de um modelo físico construído e monitorado. Então foram realizados estudos paramétricos de diversas variáveis como o tipo de solo (finos tropicais), a rigidez, o espaçamento do reforço, a inclinação e a altura do muro. Os resultados apontaram que as práticas de construção brasileiras são bem-sucedidas no que se refere ao uso de solos tropicais, sendo a coesão um parâmetro importante para MSRG em que se utilizam solos finos. O comportamento mecânico dos MSR é influenciado por diversos fatores, assim é possível o desenvolvimento de estudos em que se avalia a influência desses fatores no dimensionamento e estabilidade das estruturas. O dimensionamento de MSR de pequenas dimensões é tradicionalmente feito apenas por métodos empíricos, em que não se estabelecem as deformações, este estudo se justifica por introduzir na perspectiva dos dimensionamentos de muro uma aplicação de métodos numéricos no dimensionamento, o que o complementa.

Dantas & Ehrlich (2000), verificaram em um estudo paramétrico, que de forma geral há concordância entre métodos numéricos e empíricos. Sendo que as formulações empíricas forneceram resultados conservadores quando comparados aos obtidos por métodos numéricos.

Assim, este trabalho compara os resultados de forças de tração máxima prevista pelos métodos empíricos de projeto com os obtidos por meio da modelagem numérica no Plaxis 2D, e analisa as deformações obtidas neste modelo. Desse modo, justifica-se a necessidade de estudos de análises de muros de solo reforçado com geossintéticos, responsáveis por viabilizar obras de contenção maiores, assim, contribuir para diminuir riscos de forma segura, eficaz e econômica. O objetivo deste trabalho é apresentar um estudo de muros de solo reforçado com geossintéticos (MSRG) para avaliar a influência da geometria e da rigidez dos reforços mediante a comparação de resultados com simulações por métodos empíricos e por modelagem numérica com a utilização do programa computacional Plaxis 2D.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo, as variáveis analisadas foram: altura do talude e rigidez do reforço. Foram analisadas as propostas de estabilização de taludes hipotéticos com alturas de 5, 10 e 20 metros e com variação de dois geossintéticos, neste estudo, denominados G1 e G2, ambos do tipo geogrelha de PVA.

Para tal, os muros foram pré-dimensionados pela análise de estabilidade geotécnica interna e externa com a utilização do método de dimensionamento proposto por Ehrlich & Mitchell (1994). Os métodos são apresentados em detalhes em (Gerscovich et al, 2019; Vetermatti et al, 2004; Ehrlich e Becker, 2020). A análise por método empírico foi embasada em pré-dimensionamentos (dimensões iniciais), dimensionamento geotécnico sendo estimados os fatores de segurança, FS, para estabilidade externa (contra tombamento, deslizamento, capacidade de carga e estabilidade global) e estabilidade interna (ruptura do reforço, arrancamento, estabilidade da conexão). Os valores mínimos de FS respeitavam as definições estabelecidas pela ABNT NBR 16920 (2021) e ABNT NBR 11682 (2009), estes cálculos foram realizados em programa editor de planilhas (Excel) e não serão apresentados neste texto.

Para efetuar os cálculos pelo método empírico de Ehrlich e Mitchell (1994), de modo geral, para todos os muros, adotaram-se os critérios a seguir: i) o muro não possui embutimento, sendo apoiado sobre a superfície do terreno; ii) espaçamento constante entre as camadas de reforço geossintéticos; iii) aplicação de reforços de mesma rigidez em todas as camadas; iv) aplicação de reforços de mesmo comprimento em todas as camadas; v) inclinação constante da face 1H:10V. Na prática, para projetos econômicos, é comum que sejam adotados diferentes espaçamentos e composições dos reforços, contudo, foram adotados valores constantes, visto que essa simplificação não impacta nos objetivos deste estudo, cujo foco principal é a influência dos parâmetros de altura do muro e de rigidez do geossintético

Para a modelagem numérica foi utilizado o programa Plaxis 2D, baseado no método dos elementos finitos. A principal ferramenta desse programa é a análise de deformação de estruturas geotécnicas. Essa análise por meio de modelagem numérica teve como parâmetros principais a tensão mobilizada no reforço e as deformações da estrutura.

Todo o processo utilizado no desenvolvimento deste trabalho é sintetizado no fluxograma apresentado na Figura 12.

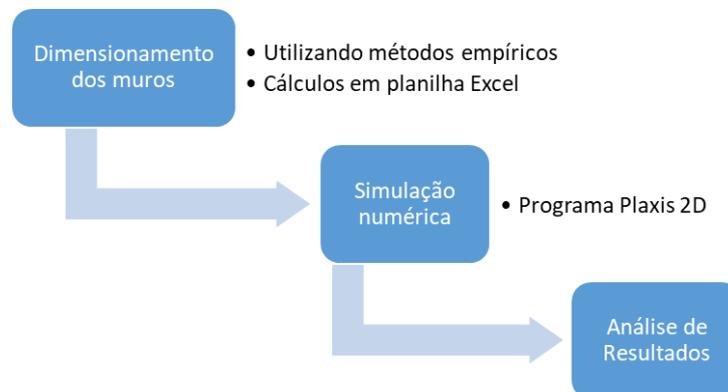


Figura 1. Fluxograma da Metodologia.

Para simulação numérica no software Plaxis, para todos os muros, adotaram-se os critérios a seguir: i) nível de água (NA) abaixo da base da fundação, considerando assim o muro como estando seco e adequadamente drenado; ii) solo com comportamento elastoplástico com critério de ruptura de Mohr-Coulomb; iii) reforço com comportamento elástico linear com critério de ruptura de deformação máxima de 10% conforme manual do fabricante do reforço; iv) a discretização foi feita por elementos triangulares, com 15 nós por elemento, seguindo a recomendação do manual; v) a face do fundo do modelo foi representada por uma condição de contorno que não permite deslocamento horizontal nem rotação (dois vínculos), mas apenas deslocamento vertical; vi) a face exposta teve uma condição de contorno sem vínculos, o que a configura como livre para se deslocar e girar; vii) a fundação foi simulada com condições de contorno livres verticalmente e restringidas horizontalmente, sendo que na base do solo é imposta condição de contorno fixa; viii) o topo do muro foi simulado sem vínculos de restrição de deslocamento ou rotação.

A simulação da compactação foi realizada segundo o Tipo 1 de modelagem proposto por Mirmoradi e Ehrlich (2014), assim como foi feito nos trabalhos de Gonçalves (2016) e Guevara (2007). Para tal foi aplicado carregamentos estáticos equivalente, distribuídos ao longo das áreas percorridas pelo rolo compactador. A tensão de compactação atuante nas camadas foi calculada conforme a formulação de Ehrlich e Mitchell (1994), assim como descrito no trabalho de Guevara (2007).

Para simular numericamente o reforço, é necessário considerar dois aspectos: a relação tensão-deformação até a ruptura e a variação de aderência com o solo para diferentes solicitações. Em se tratando da aderência do solo e reforço, a simulação é mais complicada, pois ela se dá por pequenos deslocamentos de interface e programas de elementos finitos, como o Plaxis, que simulam deformações e não deslocamentos relativos. O que dificulta uma comparação direta entre os análises de estabilidade interna associadas a esta condição. No entanto, segundo Gonçalves (2016), estudos mostraram que, no programa Plaxis, que considera perfeita aderência entre solo e reforço, utilizar o elemento reforço é eficiente, exceto nos casos em que o MSRG está próximo ao colapso ou quando se deseja avaliar a tensão cisalhante no reforço. Considerando que, de forma geral, um MSRG dificilmente atinge tensão de arrancamento, devido à significativa área de contato entre o solo e o reforço, pode-se concluir que as simulações de MSRG com a utilização de *softwares* de elementos finitos tendem a ser realistas.

Assim como no trabalho de Gonçalves (2016), nas simulações efetuadas neste estudo, adotou-se a simplificação de não proceder o embutimento do muro na fundação, visto que, em substituição, adotou-se a restrição de deslocamentos horizontais e verticais na primeira camada, considerando-se que, na prática, o embutimento do muro tem a intenção de evitar a ruptura do muro pela fundação devido à capacidade de carga ou ruptura generalizada, e para que não aconteça a ruptura por deslizamento. Para o dimensionamento, utilizam-se os parâmetros do solo de fundação e altura do muro para cálculo do embutimento, que, neste estudo, são variados, assim, o embutimento foi substituído pelas condições de contorno.

Para a construção do modelo do muro optou-se pela utilização do solo com os parâmetros adaptados daqueles adotados por Gonçalves (2016), por Ehrlich e Becker (2020) e por Dantas & Erlich (2000), cujos valores utilizados para o solo utilizado no muro e para o solo de fundação estão apresentados na Tabela 1..

Tabela 1. Parâmetros geotécnicos dos solos.

Parâmetro	Símbolo/Unidade	Muro	Fundação
Peso específico aparente	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	20	17
Peso específico aparente saturado	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	23	21
Coefficiente de Poisson	$\nu$	0,30	0,30
Ângulo de atrito	$\phi'$ (°)	35	40
Coesão	$c$ (kPa)	0	15
Módulo de deformabilidade	$E$ (kPa)	7.000	13.000
Módulo tangente inicial	$\kappa$	450	
Módulo expoente da curva tensão-deformação do solo	$\eta$	0,25	
Ângulo de dilatância	(°)	0	
Fator de redução de pico	$f\phi$	1,25	
Atividade química do solo	pH	5	
Modelo constitutivo: Mohr-Coulomb			

Optou-se por utilizar dois geossintéticos do tipo geogrelha, como utilizados por Gonçalves (2016) e Ehrlich e Becker (2020), visto que geogrelhas estão entre as opções de entrada de materiais do programa Plaxis 2D. Para dados dos parâmetros foram consultados manuais de produtos disponíveis para linha Fortrac® da empresa Huesker que comercializa geogrelhas de polímeros do tipo álcool polivinílico (PVA) e aramida. O material apresenta comportamento elástico linear, com os parâmetros apresentados na Tabela 2, conforme destaca a tabela foram analisados dois tipos de geogrelha (G1 e G2) que apresentam diferentes resistências e módulos de rigidez. A escolha destas geogrelhas foi baseada apenas em valores de resistência à tração, de forma a atender as tensões estimadas para as estruturas, não tendo sido feitas análises complementares necessárias para a definição destes materiais. Ressalta-se ainda, que o tipo de material influenciará nas simulações de tensão-deformação, devido as variações entre os parâmetros de deformabilidade apresentados pelos materiais.

As análises que serão apresentadas nos próximos itens são baseadas na comparação entre as tensões máximas mobilizadas nos reforços estimadas a partir do método empírico e simulação numérica, além dos deslocamentos estimados a partir das simulações feitas no Plaxis 2D. As tensões máximas mobilizadas no

reforço são pilares no dimensionamento interno dos MSRSG, para avaliar as condições de ruptura do reforço, arrancamento do reforço, e estabilidade da conexão entre reforço e paramento. Conforme estabelecido pela ABNT NBR 16920 (2021).

Tabela 2. Parâmetros do reforço geossintético do tipo geogrelha.

Parâmetro	Símbolo/Unidade	Valores	
		G1 <sup>1</sup>	G1 <sup>2</sup>
Resistência à tração	$T_r$ (kN/m)	110	200
Resistência à tração disponível	$T_d$ (kN/m)	38,3	69,7
Módulo de rigidez	$E_r A_r$ (kN)	1200	1600
Deformação na resistência nominal longitudinal	%	≤10	≤10
Coefficiente de aderência	$f_a$	0,80	
Fator de redução parcial para danos mecânicos de instalação	$f_{mr}$	1,15	
Fator de redução parcial por degradação ambiental	$f_{am}$	1,20	
Fator de redução parcial para fluência em tração	$f_{cr}$	2,00	
Fator de redução para incertezas estatísticas de geossintético	$f_m$	1,04	
Fator de escala	$\alpha$	0,7	
Eficiência do acoplamento	CR	85%	
Modelo constitutivo: Elástico-linear			

### 3 RESULTADOS

A Tabela 3 apresenta um resumo das características dos muros considerados e os valores obtidos pelos métodos empíricos de pré-dimensionamento analisados. São apresentados na tabela apenas os valores mais conservadores obtidos, tais valores são listados de acordo com a altura do muro.

Tabela 3. Resumo do pré-dimensionamento feito pelos métodos empíricos.

Muro <sup>3</sup>	Características				Tensões		Aprovação	
	Altura (m)	Geogrelha	Nº de camadas	Sv (m)	Lr (m)	$T_{máx}$ (kN/m)		$T_{d_{mín}}$ (kN/m)
5G1	5,0	G1	5	1,0	4,2	25,8	38,7	sim
10G1	10,0	G1	13	0,8	9,5	44,5	66,7	não
20G1	20,0	G1	34	0,6	16,5	69,2	103,8	não
5G2	5,0	G2	5	1,0	4,2	25,8	38,7	sim
10G2	10,0	G2	13	0,8	9,5	44,5	66,7	sim
20G2	20,0	G2	34	0,6	16,5	69,2	103,8	não

Para fins de comparação entre os métodos não serão apresentados valores de Fatores de segurança, mas serão feitas apenas comparações entre as tensões máximas estimadas pelos diferentes processos. Considerando os valores de resistência à tração disponível de G1 e G2 apresentadas na Tabela 2, com os valores mínimos destes parâmetros necessários para atendimento a fatores de segurança mínimo igual a 1,5 segundo a ABNT

<sup>1</sup> Tipo do reforço: Geogrelha de PVA Fortrac 110T;

<sup>2</sup> Tipo do reforço: Geogrelha de PVA Fortrac 200/30-30

<sup>3</sup> código de identificação do muro, considera a altura (primeiro número), e o tipo de geossintético utilizado (G1 ou G2). Sv é o espaçamento vertical; Lr é o comprimento do reforço;  $T_{máx}$  = tração máxima mobilizada no elemento do reforço;  $T_{d_{mín}}$  = resistência mínima de projeto;  $T_r$  = resistência à tração informada pelo fabricante;

NBR 16920 (2021), a Tabela 3 apresenta uma coluna que sinaliza a aprovação ou não da configuração proposta. Em se tratando dos fatores de segurança para arrancamento dos reforços ( $FS_A$ ), esses são influenciados pelo comprimento resistente ( $L_e$ ) desses elementos e pelo espaçamento vertical ( $S_v$ ) adotado. Estes podem ser obtidos por meio dos métodos empíricos, em que são analisados diversos arranjos geométricos possíveis, sempre que ao fim se alcance o ( $FS_A$ ) admissível. O fator de segurança para eficiência da conexão entre reforço e parâmetro ( $FSC$ ) está relacionado à eficiência do acoplamento ( $CR$ ), à resistência à tração do reforço e à tensão máxima solicitante. Assim sendo ele será maior quanto maior for a capacidade resistente da geogrelha e quão menor for a tensão máxima (que aumenta para as estruturas com maiores alturas).

Neste contexto, as configurações reprovadas deveriam ser reformuladas considerando camadas com menores espaçamentos verticais ( $S_v$ ), reduzindo assim as tensões máximas obtidas. Contudo, considerando o propósito do estudo de comparar as tensões máximas obtidas entre os métodos teórico (que considerando aspectos relacionados à altura do muro, espaçamento vertical, e peso específico do solo de construção) daquelas obtidas por simulação numérica, as configurações serão mantidas. Tendo sido excluído o muro com 20 metros por não receber aprovação em nenhuma configuração. Aponta-se que as todas as tensões máximas foram os valores encontrados para a camada de base e que esses valores sofrem um aumento conforme amplie-se a altura do muro avaliado.

A partir das simulações numéricas efetuadas no software Plaxis 2D, foram obtidas imagens que denotam as deformações nos muros, bem como gráficos de tensões transmitidas aos reforços posicionados no interior dos modelos, conforme ilustra a Figura 2. Deve-se atentar que esta imagem fornecida pelo software Plaxis, para melhor visualização, os deslocamentos estão aumentados 50 vezes.

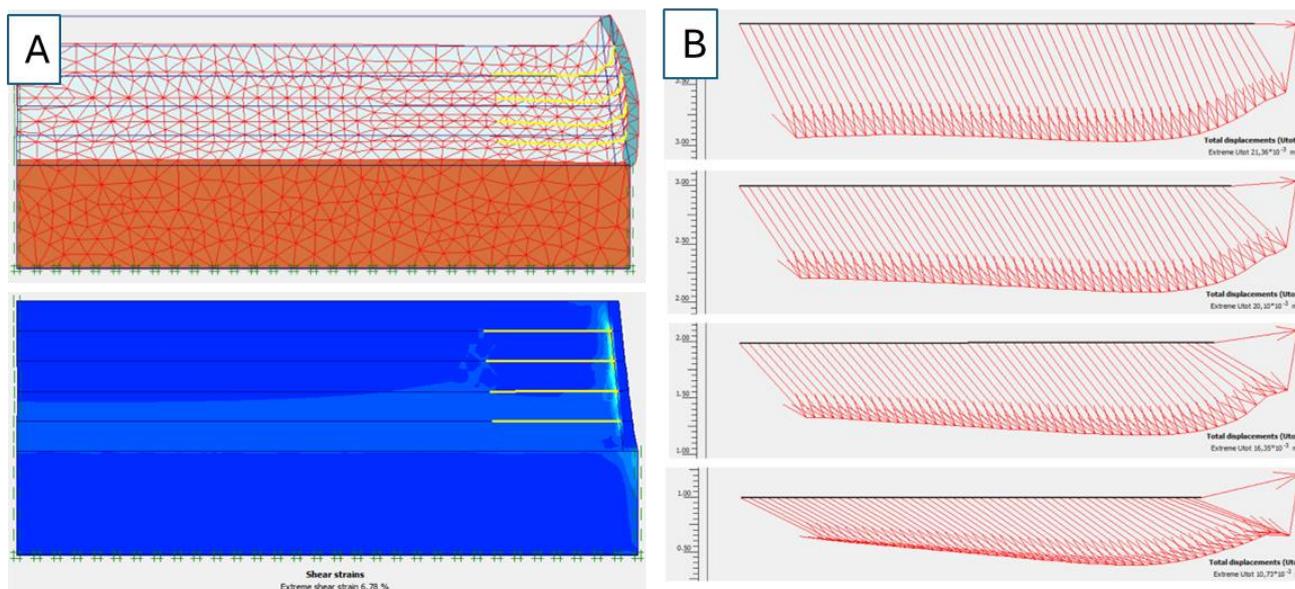


Figura 2. A) Deformações do muro M5G1, deslocamentos ampliados em 50 vezes; B) Distribuição de tensões para diferentes camadas de reforço do muro M5G1.

Para estes muros não se procedeu a análise de resultados detalhada que foi realizada para os outros muros considerando que não poderia ser executado. O modo de falha da estrutura se dá por “embarrigamento”, o que acontece pois o geossintético tem de suportar a deformação do bloco e a tensão à tração. Em simulações numéricas existe a limitação de não ser considerada a ruptura e arrancamento do reforço, analisando apenas o escoamento plástico do elemento, assim, após atingir determinada tensão máxima, essa se mantém e as cargas na estrutura são redistribuídas até que se atinja a estabilidade interna (GONÇALVES 2016).

Os valores de tensão máxima obtidas pelos métodos empíricos e a partir das simulações numéricas são apresentadas no gráfico da Figura 4, as tensões são apresentadas em relação a elevação (altura) do muro para os muros dimensionados com 5 e 10 metros de altura. A razão entre os valores de tensão por métodos empíricos e tensão por modelagem numérica tiveram uma média de 0,89 para o 5G1 e de 0,88 para o 5G2. Mas se tratando apenas dos valores de tensão máxima obtidos, o valor dado pela modelagem numérica foi superior ao do método empírico em 1,20 vezes para ambos os muros. Contudo, em ambos os métodos os valores de  $T_{máx}$

foram inferiores ao  $T_d$  apresentado pela geogrelha G1, resultando na aprovação do projeto em ambos os métodos. Para a configuração de 10 m, a razão entre as tensões foi em média igual a 1,14 para o 10G1 e de 0,94 para o 10G2. Mas se tratando apenas dos valores de tensão máxima obtidos, o valor dado pela modelagem numérica foi superior ao do método empírico em 1,18 vezes para 10G1 e 1,02 para 10G2. Apenas a configuração 10G2 seria aprovada com valores de  $T_{máx}$  inferiores a  $T_d$  oferecido pela geogrelha G2. Verificando-se coerência entre os métodos, mesmo com as discrepâncias verificadas na Figura 3.

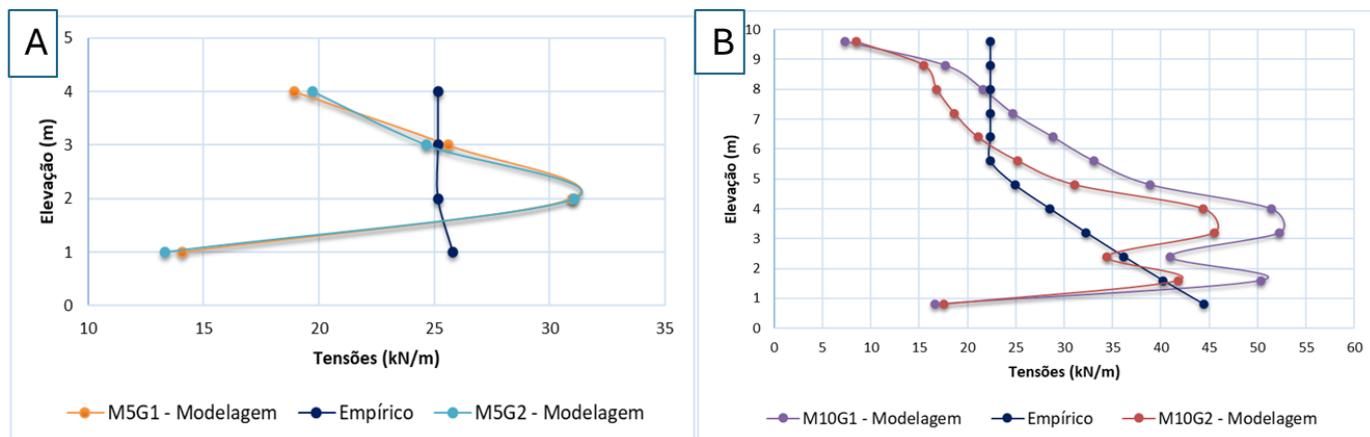


Figura 3. A) Gráfico de tensões por elevação para o muro com 5m. B) Gráfico de tensões por elevação para o muro com 10m

Com relação aos deslocamentos, estes foram proporcionais às alturas do muro e apresentam-se maiores nos muros de maior altura, como poder observado no gráfico da Figura 4. Nos muros de 5,00 m os deslocamentos de maior valor estão localizados mais próximos ao topo da estrutura, para ambos os muros o deslocamento máximo acontece em 4,00 m, com valor de 2,14 cm para o M5G1 e 2,07 cm para o M5G2. Observa-se assim que o muro com reforço mais rígido possui menores valores de deslocamento. Com relação aos muros de 10,00 m, os maiores deslocamentos estão localizados no terço superior da estrutura e não no topo desta, o muro M10G1 apresentou um deslocamento máximo de 12,23 cm na altura de 8,00 m, e o muro M10G2 teve um deslocamento de 9,42 cm na altura de 7,20 m. Assim, observa-se a diminuição dos deslocamentos conforme o aumento da rigidez do esforço. Segundo Gonçalves (2016), há maior mobilização do reforço com o aumento da rigidez, independentemente do tipo de solo.

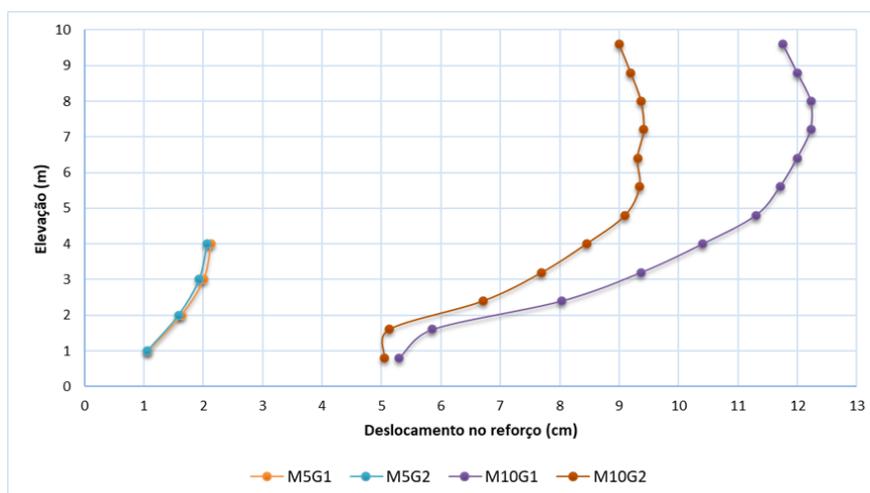


Figura 3. Gráfico de deslocamentos estimados nos reforços em relação a elevação para os muros de 5 e 10 m.

Nos trabalhos de Hatami e Barthust (2005) e de Gonçalves (2016) o deslocamento máximo medido para modelagem do modelo físico estava localizado na altura média do muro. O trabalho de Guevara (2007)

mostrou que as trajetórias de tensão e deformações variam conforme o tipo de muro utilizado, assim apresentou um muro de solo envelopado cujas deformações se apresentaram maiores na altura média, enquanto para o muro de blocos de concreto ocorreram no topo.

## 5 CONCLUSÕES

Os métodos empíricos são práticos, mais simples e fornecem adequada abordagem inicial para os cálculos de muros. Assim são uma excelente ferramenta para uma análise preliminar dessas estruturas. A modelagem numérica se mostrou uma ferramenta mais complexa, devido ao fato de ser necessário o domínio do software utilizado, bem como conhecimentos sobre seu modo de análise para não incorrer em erros. Mas a modelagem torna-se necessária para a análise dos deslocamentos e deformações que não são considerados pelos métodos empíricos, ganhando em relevância quando são projetadas estruturas mais altas.

A utilização de simulações numéricas em análises se apresenta indispensável para prática de projeto e construção de MSRGE, dada sua possibilidade de análise de resistência e deformabilidade. A análise da superfície de ruptura merece aprofundamento, visto que as máximas solicitações obtidas para os reforços não necessariamente apresentaram o comportamento previstos na literatura.

## AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à Universidade Federal de Ouro Preto e ao Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas (NUGEO/UFOP) e ao Programa de Pós-graduação em Geotecnia (POSGEO) pelo apoio no desenvolvimento do trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2021). NBR 1620-1. *Muros e taludes de solos reforçados. Parte 1: solos reforçados em aterros*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR 11682. *Estabilidade de encostas*. Rio de Janeiro.
- DANTAS, B. & EHRLICH, M. (2000). Método de Análise de Taludes Reforçados sob Condições de Trabalho. *Solos e Rochas*, 113-133.
- EHRLICH, M., BECKER, L. (2020) *Muros e taludes de solo reforçado*. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos.
- EHRLICH, M., & MITCHEL, J. (1994). Working stress design method for reinforced soil walls. *Journal of Geotechnical*, 625-645.
- GERSCOVICH, D. M., DANZIGER, B., R., SARAMAGO, R. (2019). *Contenções: teoria e aplicações em obras*. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2019. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 16 abr. 2024.
- GONÇALVES, J. F. (2016). *Estudo Numérico do Comportamento de Muros de Solo Reforçado com Geossintético*. São Paulo: Tese de mestrado Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- GUEVARA, F. N. (2007). *Comparação de Métodos de Projeto para Muros de Solo Reforçado com Geossintéticos*. Dissertação de Mestrado - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 162.
- HATAMI, K. & BATHURST, R. (2006). Numerical model for reinforced soil segmental walls under surcharge loading. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132, 673-684.
- MIRMORADI, S. & EHRLICH, M. (2014). Modeling of the compaction-induced stresses in numerical analyses of GRS walls. *International Journal of Computational Methods*.
- VERTEMATTI, J., C. (2004) ABINT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE NÃO TECIDOS E TECIDOS TÉCNICOS. *Manual brasileiro de geossintéticos*. 1. ed. São Paulo: Blucher.