



UFC
UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE CRATEÚS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

FABIANO GOMES BARBOSA JÚNIOR

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE MURO REFORÇADO COM GEOSSINTÉTICO
E MUROS DE ARRIMO CONVENCIONAIS VIA MÉTODO DOS ELEMENTOS
FINITOS**

CRATEÚS

2023

FABIANO GOMES BARBOSA JÚNIOR

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE MURO REFORÇADO COM GEOSINTÉTICO E
MUROS DE ARRIMO CONVENCIONAIS VIA MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Civil da Universidade
Federal do Ceará, como requisito parcial à
obtenção do título de bacharel em Engenharia
civil.

Orientador: Prof. Me. Marcio Avelino de
Medeiros

CRATEÚS

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

J1e Júnior, Fabiano.
estudo comparativo entre muro reforçado com geossintético e muros de arrimo convencionais via método dos elementos finitos / Fabiano Júnior. – 2023.
39 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, Curso de Engenharia Civil, Crateús, 2023.
Orientação: Prof. Me. Marcio Avelino de Medeiros.

1. Estruturas de contenção. 2. Muro de Solo Reforçado com Geossintético. 3. Muro de flexão. 4. Método dos Elementos Finitos. 5. Comparativo de Deslocamentos e Deformações. I. Título.

CDD 620

FABIANO GOMES BARBOSA JÚNIOR

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE MURO REFORÇADO COM GEOSSINTÉTICO E
MUROS DE ARRIMO CONVENCIONAIS VIA MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Civil da Universidade
Federal do Ceará, como requisito parcial à
obtenção do título de bacharel em Engenharia
civil.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Marcio Avelino de Medeiros (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Me. Thiago Fernandes da Silva
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Me. Felipe Carlos de Araújo Leal
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

A Deus.

Aos meus familiares, Aliny Kelder, José
Demuntiê e Antônia Vanja.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me permitir esta conquista.

Ao Professor Marcio Avelino de Medeiros, pela orientação e disponibilidade em me auxiliar a concluir este estudo.

A minha família, pelo amor incondicional.

Aos meus colegas discentes, pelo companheirismo.

A todos meus amigos, pela presença, apoio e momentos compartilhados juntos.

RESUMO

Durante o projeto de uma estrutura de contenção, a escolha do tipo de muro a ser adotado é o primeiro passo para garantia de seu funcionamento adequado. Um dos fatores a se considerar nessas estruturas é o comportamento em relação a deformações e deslocamentos. Mediante tal análise, esse trabalho objetivou realizar um comparativo de deformações e deslocamentos entre dois sistemas de contenções diferentes, sendo escolhidos o Muro de Solo Reforçado com Geossintético (MSRG) e o muro de flexão convencional em concreto armado. Para isso, foram coletados dados de solo assim como o dimensionamento desses muros de contenção. Para a análise foi feita uma modelagem em um software geotécnico que usa o Método dos Elementos Finitos, o Plaxis 2D. Ao fim, foi possível encontrar valores menores de deslocamento horizontal absoluto e maiores de deformação, de forma geral, para o muro de flexão. A deformação relativa, para muros de 9 metros, apresentou melhores valores no MSRG e para 4 metros para o muro de flexão.

Palavras-chave: Estruturas de contenção. Muro de Solo Reforçado com Geossintético. Muro de flexão. Método dos Elementos Finitos. Comparativo de Deslocamentos e Deformações.

ABSTRACT

During the design of a containment structure, choosing the type of wall to be adopted is the first step to guarantee its proper functioning. One of the factors to be considered in these structures is the behavior in relation to deformations and displacements. Through this analysis, this work aimed to compare deformations and displacements between two different retaining systems, choosing the Soil Wall Reinforced with Geosynthetic (MSRG) and the conventional bending wall in reinforced concrete. For this, soil data were collected as well as the design of these retaining walls. For the analysis, a modeling was made in a geotechnical software that uses the Finite Element Method, Plaxis 2D. At the end, it was possible to find smaller values of absolute horizontal displacement and larger values of deformation, in general, for the bending wall. The relative deformation, for walls of 9 meters, presented better values in the MSRG and for 4 meters for the bending wall.

Keywords: Containment structures. Soil Wall Reinforced with Geosynthetic. Bending wall. Finite Element Method. Comparison of Displacements and Strains.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	-	Verificação de estabilidade externa.....	18
Figura 2	-	Análise de estabilidade interna: (A) Ruptura dos reforços; (B) Arrancamento dos reforços; (C) Desprendimento da face; (D) Instabilidade local.....	21
Figura 3	-	Muro de flexão.....	23
Figura 4	-	Muro de flexão e muro de solo reforçado com geossintético modelado 9m...	24
Figura 5	-	Muro de flexão e muro de solo reforçado com geossintético modelado 4m...	25
Figura 6	-	Deslocamento horizontal do muro de flexão.....	26
Figura 7	-	Deslocamento horizontal MSR.....	27
Figura 8	-	Deslocamento horizontal por elemento MSR.....	28
Figura 9	-	Deslocamento horizontal por elemento muro de flexão.....	28
Figura 10	-	Localização dos pontos analisados 9 e 4 metros.....	29
Figura 11	-	Deformação máxima e deslocamento horizontal máximo do muro de flexão 9m.....	30
Figura 12	-	Deformação máxima e deslocamento horizontal máximo do muro de solo reforçado com geossintético 9m.....	31
Figura 13	-	Deformação máxima e deslocamento horizontal máximo do muro de flexão 4m.....	32
Figura 14	-	Deformação máxima e deslocamento horizontal máximo do muro de solo reforçado com geossintético 4m.....	33

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	-	Deslocamento horizontal máximo e deformação total máxima.....	34
Gráfico 2	-	Deslocamentos dos pontos 9m e 4m.....	35
Gráfico 3	-	Distorção relativa para 4m e 9m.....	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	-	Fator de segurança mínimo para estabilidade de muros de contenção.....	18
Tabela 2	-	Fatores de redução para maciços reforçados	22
Tabela 3	-	Parâmetros de solo adotados.....	23

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
MSRG	Muro de Solo Reforçado com Geossintético
NBR	Norma Brasileira Regulamentar

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	15
1.1.1	<i>Objetivo geral</i>	15
1.1.2	<i>Objetivos específicos</i>	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	Estruturas de contenção	15
2.2	Muro de solo reforçado com geossintético (MSRG)	15
2.2.2	<i>Dimensionamento do MSRG</i>	17
2.2.2.1	<i>Coeficiente de empuxo</i>	17
2.2.2.2	<i>Estabilidade externa</i>	18
2.2.2.3	<i>Deslizamento</i>	19
2.2.2.4	<i>Tombamento</i>	19
2.2.2.5	<i>Capacidade de carga da fundação</i>	20
2.2.2.6	<i>Análise de estabilidade global</i>	20
2.2.2.7	<i>Análise de estabilidade interna</i>	21
2.3	Muro de flexão	23
3	METODOLOGIA	23
4	RESULTADOS	30
5	CONCLUSÃO	37

1 INTRODUÇÃO

Obras de contenção possuem a função de garantir a estabilidade, além de fornecerem suporte para os maciços de rocha ou terra, com isso, evitando o seu escorregamento devido ao peso próprio ou de cargas externas (BARROS, 2013). As formas mais comuns de se encontrar esses muros de sustentação são por gravidade (construído de alvenaria ou de concreto simples ou ciclópico) e por flexão que é feito em concreto armado. Assim, estruturas desse tipo são essenciais para a execução de obras locadas em solos considerados impróprios para a construção.

Essas obras possuem diversos métodos construtivos, com os mais variados materiais para as suas composições. Um desses materiais, que vem se tornando cada vez mais presente, são os geossintéticos que são produtos poliméricos industrializados que podem desempenhar inúmeras funções em obras geotécnicas, entre elas as mais importantes são: reforço, filtração, drenagem, separação, impermeabilização e controle de erosão superficial. Com métodos que usam geossintéticos a execução de determinadas obras acaba se tornando mais eficiente e barata (NBR 12553, 2003).

Um desses métodos que teve origem a partir do solo reforçado, técnica patenteada pelo engenheiro francês Henri Vidal denominada Terra Armada, foi o Muro de Solo Reforçado com Geossintético. Método esse que é composto por estruturas que possuem uma face vertical, ou quase vertical, e são feitas para conter a massa vizinha, assim como os muros de gravidade convencionais. Além disso, é possível ter agilidade em seu método construtivo, podem reduzir os custos, possuem a capacidade de suportar recalques diferenciais e um bom desempenho sísmico sem danos na estrutura (PALMEIRA, 2018). Essas vantagens são o que tornam essas estruturas populares, uma vez que elas oferecem segurança acompanhada de baixos custos.

Assim, esse trabalho tem como objetivo comparar o campo de deformação no muro de solo reforçado com geossintético com o de um muro de arrimo convencional, o muro de flexão. O presente estudo investiga, por meio de modelagem computacional via método dos elementos finitos, a deformação gerada no solo, com mesmas condições, quando executado diferentes estruturas de contenção, são elas: muro de flexão e muro de solo reforçado com geossintético.

Dessa forma, este estudo analisa até que ponto o muro de arrimo tradicional é justificável, uma vez que ele não é recomendado para grandes alturas, possui um custo alto e uma execução demorada quando comparado ao MSRG que é capaz de contemplar esses três

requisitos.

1.1 **Objetivos**

1.1.1 *Objetivo geral*

Comparar o campo de deformação de um muro de flexão e um muro de solo reforçado com geossintético.

1.1.2 *Objetivos específicos*

- Gerar, por meio de modelagem computacional, as estruturas de contenções.
- Obter o campo tensão-deformação gerado no muro de flexão e no muro de solo reforçado com geossintético, via método dos elementos finitos.
- Comparar os métodos de construção com relação ao comportamento do campo tensão-deformação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Estruturas de contenção

Para Barros (2013), estruturas de contenção são obras civis que têm a função de evitar o rompimento de maciços de terra ou de rocha devido a forças externas ou ao próprio peso. As construções de contenção estão entre as construções humanas mais antigas. Dessa maneira, é notável a importância delas.

A forma de análise de uma obra de arrimo consiste em verificar o equilíbrio presente no conjunto gerado pelo maciço de solo e a estrutura de contenção. Esse equilíbrio depende de características do solo e do muro, algumas delas são: deformabilidade, permeabilidade e peso próprio, além da forma como esses elementos interagem entre si. Dessa forma, essa análise se torna algo difícil, assim, sendo comum a adoção de modelos teóricos que tornem possível essa análise (BARROS, 2013).

2.2 Muro de solo reforçado com geossintético (MSRG)

Os muros de solo reforçados com geossintético têm origem nos muros reforçados, que são estruturas com a face vertical ou próximas disso e possuem a função de conter a massa vizinha, assim como muros de gravidade. No geral o reforço, o geossintético, é instalado no talude com o intuito de manter sua própria estabilidade (PALMEIRA, 2018).

Solos reforçados funcionam da seguinte maneira: uma vez que o solo tem baixa

resistência à tração, é adicionado um reforço que irá trabalhar junto ao solo, em seguida o solo e o reforço começarão a se comportar como um corpo monolítico e coeso, assim, sendo capaz de resistir ao peso próprio e às cargas externas para as quais foi projetado. Os materiais podem ser metálicos ou poliméricos, no caso é usada a segunda opção, com elevada resistência à tração, sendo posicionados em camadas horizontais. Assim, ganhando resistência à tração do maciço devido ao atrito entre o solo e o reforço (GONÇALVES, 2016).

O método construtivo que será usado influi no comportamento do MSRG. Um desses métodos é o auto-envelopado, que consiste em estender a tira de geossintético, compactar a camada de solo contido até a altura do projeto e dobrar a tira de geossintético sobre a camada compactada. Dessa forma, é possível confinar a superfície externa do solo entre dois reforços. Assim vai sendo construído o muro, em camadas, até que seja alcançada a altura do projeto.

2.2.2 Dimensionamento do MSRG

2.2.2.1 Coeficiente de empuxo

Quando uma estrutura é considerada rígida, não permitindo qualquer tipo de deslocamento, pode-se dizer que as pressões existentes são chamadas de pressões no repouso e o que resulta dessas pressões exercidas pelo solo é o empuxo em repouso (E_r). O coeficiente de empuxo no repouso (K_0) é a relação entre a tensão efetiva horizontal (σ'_h) e a tensão efetiva vertical (σ'_v), como indica a equação 1.

$$K_0 = \sigma'_h / \sigma'_v \quad (1)$$

Denomina-se empuxo de terra ativo (E_a) a pressão gerada pelo solo no muro de arrimo, que se deforma, mas resiste. Quando a parede é empurrada contra o solo, causando compressão nele, tem-se o empuxo passivo (E_p). Essas pressões são chamadas de ativa e passiva e os coeficientes de empuxo, ativo (K_a) e passivo (K_p).

Os valores para K_a variam de acordo com o método de cálculo usado para encontrá-lo, para métodos tradicionais de estados-limite é comum o uso do método de Rankine, mostrado na equação 2.

$$K_a = \tan^2(45^\circ - \phi'/2) \quad (2)$$

De acordo com Das (2011), a pressão ativa de Rankine pode ser apresentada para

um muro sem atrito por meio da equação 3.

$$[\sigma_h]_a = \sigma'_v \cdot K_a - 2 \cdot c' \cdot \sqrt{K_a} + q \cdot K_a + \gamma_w \cdot h_w \quad (3)$$

Onde $[\sigma_h]_a$ e σ'_v são as pressões horizontal ativa e a tensão vertical efetiva, o K_a é o coeficiente de empuxo ativo, c' é a coesão efetiva, q é a sobrecarga, γ_w é o peso específico da água e h_w é a altura do nível da água.

O coeficiente de empuxo passivo pode ser obtido a partir da equação 2 para solos granulares, como é indicado na equação 4.

$$K_a = \tan^2(45^\circ + \phi'/2) \quad (4)$$

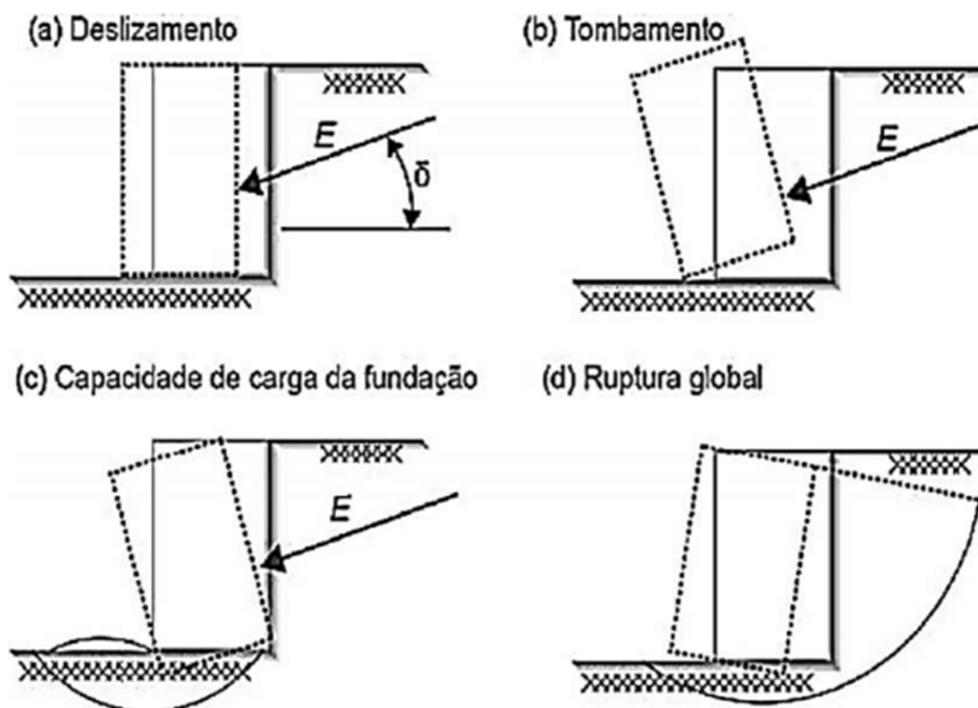
2.2.2.2 Estabilidade externa

De várias maneiras a forma de analisar a estabilidade de um muro de solo reforçado com geossintético é parecida com a de um muro de gravidade convencional. As condições de estabilidade que devem ser atendidas são basicamente: estabilidade externa; estabilidade interna; estabilidade global (PALMEIRA, 2018).

Os métodos do equilíbrio limite são os mais difundidos e empregados na prática, uma vez que os projetistas já estão familiarizados com os conceitos usados. Esses métodos supõem que a estrutura está na iminência do colapso e total mobilização da resistência ao cisalhamento do solo (BECKER, 2015).

Assim, são realizados os cálculos usando os fatores de segurança mínimos relacionados aos possíveis mecanismos de ruptura. São eles, deslizamento, tombamento, capacidade de carga da fundação e ruptura global como indicados na Figura 1.

Figura 1 – Verificação de estabilidade externa.



Fonte – Vertematti (2004)

Os fatores de segurança mínimos que devem ser atendidos para manter a estabilidade de muros de flexão e gravidade, mostrados na tabela 1, são indicados pela NBR 11682 – Estabilidade de encostas (ABNT, 2009).

Tabela 1 – Fator de segurança mínimo para estabilidade de muros de contenção.

Verificação da segurança		FS mínimo
Deslizamento		1,5
Tombamento		2,0
Capacidade de carga da fundação		3,0
Ruptura global	Obra provisória	1,3
	Obra permanente	1,5

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 11682 (modificado, 2009)

2.2.2.3 Deslizamento

A segurança contra o deslizamento é obtida por meio do equilíbrio dos esforços solicitantes (GERSCOVICH, 2010). Depois que é realizado o pré-dimensionamento das estruturas de contenção, é necessário analisar as forças que atuam como, por exemplo, a sobrecarga, o empuxo, a água e os esforços resistentes a fim de verificar o atendimento do fator de segurança mínimo que é estabelecido pela NBR 11682 – Estabilidade de encostas (ABNT, 2009).

O fator de segurança ao deslizamento pode ser encontrado pela equação 5.

$$F_{sd} = \frac{\gamma * H * t g \phi'_1 * L_r}{E} \geq 1,5 \quad (5)$$

Onde γ é o peso específico do solo reforçado, H é a altura do maciço reforçado, ϕ'_1 é o ângulo de atrito entre a base do maciço reforçado e o solo de fundação e E é o empuxo ativo. Dessa forma, é possível encontrar um valor para o comprimento de reforço (L_r).

2.2.2.4 Tombamento

A segurança contra o tombamento dependerá de o momento resistente ser maior que o momento atuante. Onde o momento resistente é o gerado pelo peso do muro, enquanto o momento atuante corresponde ao momento do empuxo total atuante sobre o muro. O fator de segurança ao tombamento (F_{st}) é pode ser encontrado pela equação 6.

$$F_{st} = \frac{W * L_r / 2}{E * y_e} \geq 2,0 \quad (6)$$

Para o qual, W é o peso do muro, L_r é a largura da base do muro de solo reforçado e o y_e é o braço de alavanca do empuxo ativo em relação ao pé da estrutura. Dessa maneira é encontrado um valor para L_r que garanta a estabilidade quanto ao tombamento.

2.2.2.5 Capacidade de carga da fundação

A capacidade de carga da fundação é encontrada com a verificação da segurança à ruptura e deformações excessivas do terreno de suporte. A resultante das tensões na base do muro deve garantir que toda a base esteja sofrendo somente compressão. Dessa forma, a excentricidade (e) de ser menor que um sexto de L_r . Como é indicado na equação 7.

$$e = \frac{E * y_e}{R} = \frac{E * y_e}{\gamma * H * L_r} \leq \frac{L_r}{6} \quad (7)$$

O fator de segurança contra a ruptura do solo de fundação (FS_f) pode ser encontrado pela equação 8.

$$FS_f = \frac{q_{m\acute{a}x}}{\sigma_v m\acute{a}x} \geq 3,0 \quad (8)$$

Para encontrar a capacidade de carga do solo de fundação ($q_{m\acute{a}x}$) pode ser estimado pela Teoria de Terzaghi mostrado na equação 9.

$$q_{m\acute{a}x} = c' * N_c * + q * N_q + 0,5 * \gamma f * B' * N_\gamma \quad (9)$$

Onde c' é a coesão do solo de fundação, q é a sobrecarga no nível da base da

estrutura e o γf é o peso específico do solo de fundação. N_c e N_q são fatores de capacidade de carga que podem ser encontrados a partir das equações 10 e 11.

$$N_q = \frac{(e^{[\frac{3\pi}{4} - \frac{\phi'}{2}] * \text{tg}\phi'})^2}{2 * \cos^2(45 + \frac{\phi'}{2})} \quad (10)$$

$$N_c = \text{cotg}\phi' * (N_q - 1) \quad (11)$$

O fator de capacidade de carga N_γ pode ser encontrado em tabelas que dependem do ângulo de atrito em Das (2011).

A tensão máxima atuante ($\sigma_{v \text{ máx}}$) é encontrada através da equação 12.

$$\sigma_{v \text{ máx}} = \frac{\Sigma \text{Peso}}{AB} * (1 + \frac{6 * e}{AB}) \quad (12)$$

Onde A é a altura e B é a base do muro.

Enquanto que para o cálculo da tensão mínima atuante ($\sigma_{v \text{ mín}}$), é usado a equação 13.

$$\sigma_{v \text{ mín}} = \frac{\Sigma \text{Peso}}{AB} * (1 - \frac{6 * e}{AB}) \quad (13)$$

As equações 12 e 13 só serão validas quando:

$$\sigma_{v \text{ mín}} \geq 0$$

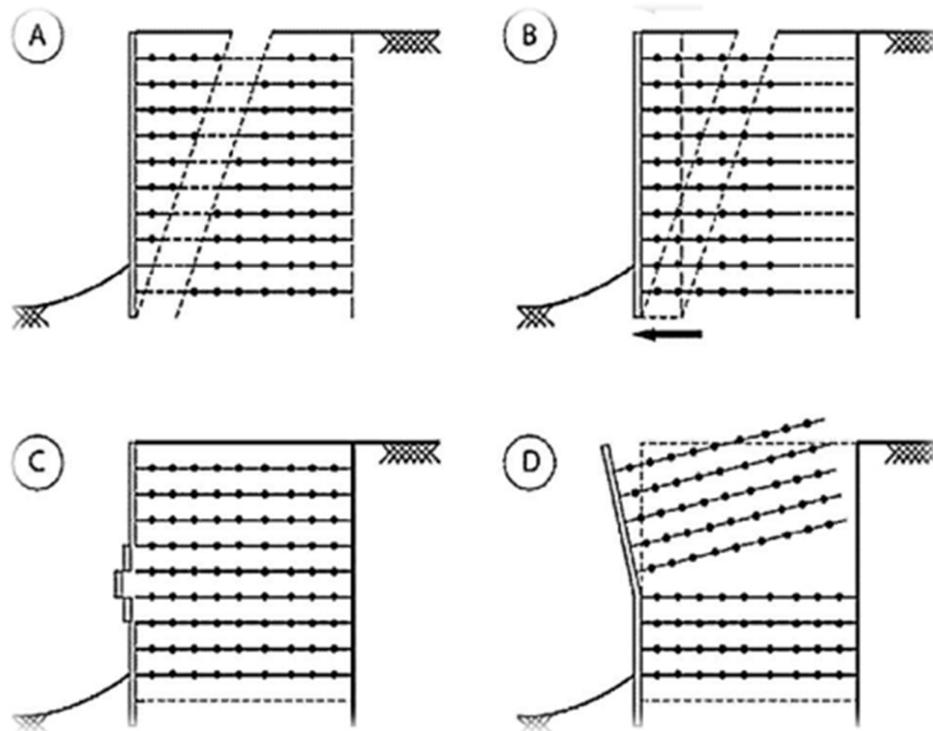
2.2.2.6 *Análise de estabilidade global*

Na análise de estabilidade global, o principal foco é em encontrar mecanismos de ruptura não considerados nas análises de estabilidade interna e externa. Assim, são necessários métodos de análise de instabilidade de taludes, com o uso de programas computacionais. O método adotado pode variar com as condições geométricas do terreno, as propriedades dos solos, as heterogeneidades, as condições de fluxo e dos tipos de carregamentos (PALMEIRA, 2018).

2.2.2.7 *Análise de estabilidade interna*

Para o solo reforçado com geossintético, a análise de estabilidade interna deve garantir que não ocorra colapsos por tração, arrancamentos dos elementos de reforço ou instabilidade na face como mostrado na Figura 2. Para tal, deve-se realizar a verificação da máxima tensão de tração do reforço, da resistência ao arrancamento, da conexão dos reforços com o sistema de faceamento e da instabilidade de trechos (EHRlich; BECKER, 2009).

Figura 2 - Análise de estabilidade interna: (A) Ruptura dos reforços; (B) Arrancamento dos reforços; (C) Desprendimento da face; (D) Instabilidade local.



Fonte: Ehrlich e Becker (2009).

Essa verificação tem como objetivo a força de tração máxima presente nos reforços a partir das tensões que ocorrem dentro do maciço. O fator de segurança que analisa a ruptura do reforço, em cada camada, é dado pela relação entre as forças resistentes e as forças atuantes (MITCHELL, VILLET e BOARD, 1987). Essa relação é mostrada na Equação 14, e a força admissível é vista na Equação 15.

$$F_s = \frac{\Sigma \text{FORÇAS RESISTENTES}}{\Sigma \text{FORÇAS ATUANTES}} = \frac{T_{adm}}{\gamma * z * k_a * S_v * S_h} \geq 1,0 \quad (14)$$

$$T_{adm} = \frac{T_{ult}}{FS_{di} * FS_{cr} * FS_{dq} * FS_{db}} \quad (15)$$

Onde k_a é o coeficiente de empuxo ativo, z é a profundidade, γ é o peso específico do aterro reforçado, S_v é o espaçamento vertical entre as camadas de reforços, S_h é o espaçamento horizontal entre os reforços e T_{ult} é a resistência à tração máxima do material de reforço, que é obtida do ensaio de tração.

Os fatores de redução usados na Equação 15 estão relacionados na Tabela 2.

Tabela 2 – Fatores de redução para maciços reforçados.

Tipo de fator de redução da resistência à tração	Símbolos	Valores
Fator quanto a danos de instalação	FSdi	1,1 a 2,0
Fator quanto à fluência	FScr	2,0 a 4,0
Fator quanto à degradação química	FSdq	1,0 a 1,5
Fator quanto à degradação biológica	FSdb	1,0 a 1,3

Fonte: Koerner (1999).

A análise de resistência ao arrancamento tem o objetivo de informar o comprimento total do reforço, que é dividido em duas partes, sendo uma delas o comprimento livre e a outra o de ancoragem. Esses comprimentos se encontram, respectivamente, na zona ativa onde não contribui para a resistência ao arrancamento e na zona passiva onde atua efetivamente na resistência ao arrancamento (MITCHELL, VILLET e BOARD, 1987). A Equação 16 mostra como calcular o comprimento livre.

$$L_l = (H - z) * \tan(45^\circ - \phi'/2) \quad (16)$$

Onde H é a altura do solo reforçado, z é a altura de solo acima do nível de reforço considerado e ϕ' é o ângulo de atrito efetivo do solo.

É recomendado por Mitchell, Villet e Board (1987) um coeficiente de segurança para a resistência ao arrancamento entre 1,50 a 1,75. O comprimento de ancoragem (L_a) em cada reforço é dado pela Equação 17 onde é indicado um comprimento mínimo de 1,0 metro. O comprimento total de reforço é a soma do comprimento ancorado com o comprimento livre e δ é o ângulo de atrito entre o solo e o elemento de reforço.

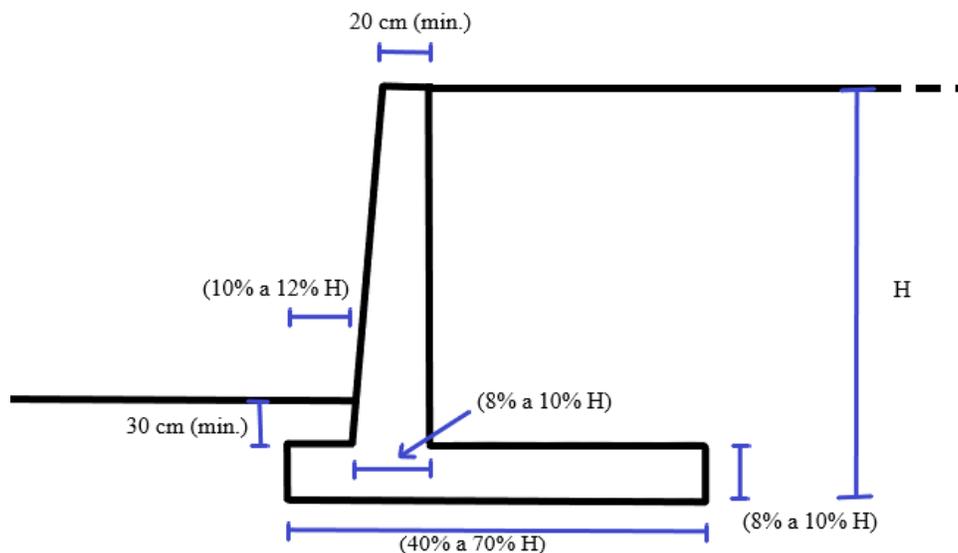
$$L_a = \frac{\gamma * z * K_a * S_v * FS}{2 * \gamma * z * \tan \delta} \quad (17)$$

2.3 Muro de flexão

É um muro que é executado em concreto armado e são projetados para resistir aos esforços de flexão advindos do empuxo. Suas seções transversais na maioria das vezes são em L, compostas por duas lajes, uma horizontal, que serve de fundação e para equilibrar o empuxo, e outra vertical engastada na base do muro.

O muro de flexão deve ter uma proporção de 40 a 70% da dimensão da base em relação à altura do maciço. Para alturas superiores a 7 metros é conveniente utilizar contrafortes para aumentar a resistência contra o tombamento (MANCHERTTI, 2007). A Figura 3 mostra como são adotados os valores para o muro de flexão.

Figura 3 – Muro de flexão.



Fonte: Manchertti (modificado, 2022).

Nesse tipo de muro, a dimensão conhecida é a altura, em que o dimensionamento leva em consideração a extensão de 1 metro de muro. Quando a extensão do muro for superior a 25m, é recomendado o uso de juntas de dilatação a cada 25m, com o intuito de minimizar os impactos gerados pela variação da temperatura.

3 METODOLOGIA

A modelagem foi realizada usando o Plaxis 2D, que é um software geotécnico que usa o Método dos Elementos Finitos. Foi considerado o modelo Plástico durante o uso do programa. Além disso em sua utilização são necessários dados específicos relacionados ao solo e aos materiais usados.

De acordo com a literatura foram adotados os seguintes valores de parâmetros.

Tabela 3 – Parâmetros de solo adotados.

Material	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito interno (°)	Peso específico natural (kN/m ³)	Peso específico saturado (kN/m ³)
Solo natural (argila)	10	31	17	20
Solo de reforço (areia)	0	30	17,5	18
Concreto armado	0	-	25	-

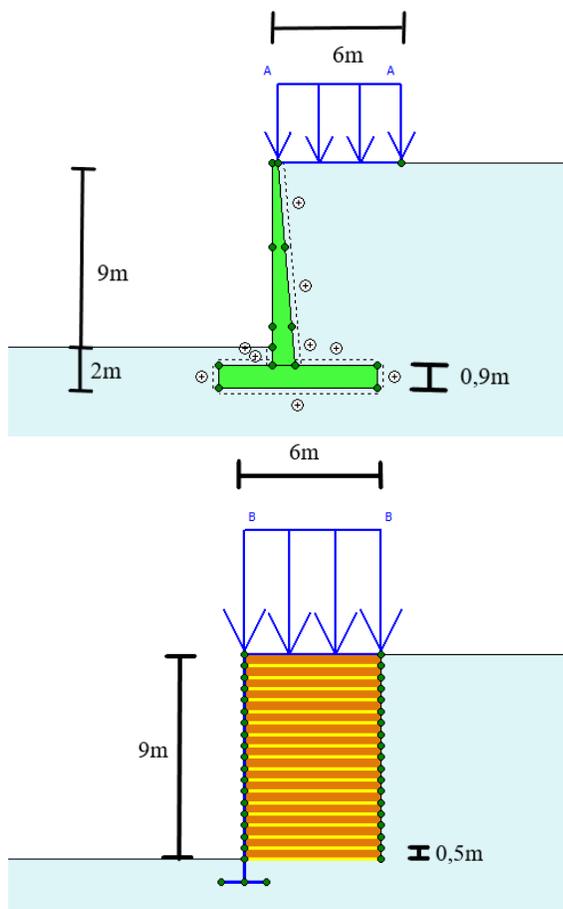
Fonte: Autor (2022).

Para o cálculo da força admissível do geossintético foram considerados os valores médios dos fatores de redução quanto aos danos de instalação ($FS_{di} = 1,55$), quanto à influência ($FS_{cr} = 3,00$), quanto a degradação química ($FS_{dq} = 1,25$) e quanto à degradação biológica ($FS_{db} = 1,15$). A geogrelha usada foi a Fortrac R 300/50 – 30T, esse material possui uma resistência a tração de 300kN/m^2 .

Para o dimensionamento dos muros, foi verificado a estabilidade externa e interna usando a teoria de Rankine. Além disso, foi posicionada uma carga de 25kN/m^2 ao longo de 6m para os dois muros para simular a carga de veículos. Após a realização do pré-dimensionamento das estruturas para um talude de 4 e 9 metros foi realizada a calibração das modelagens no software de elementos finitos.

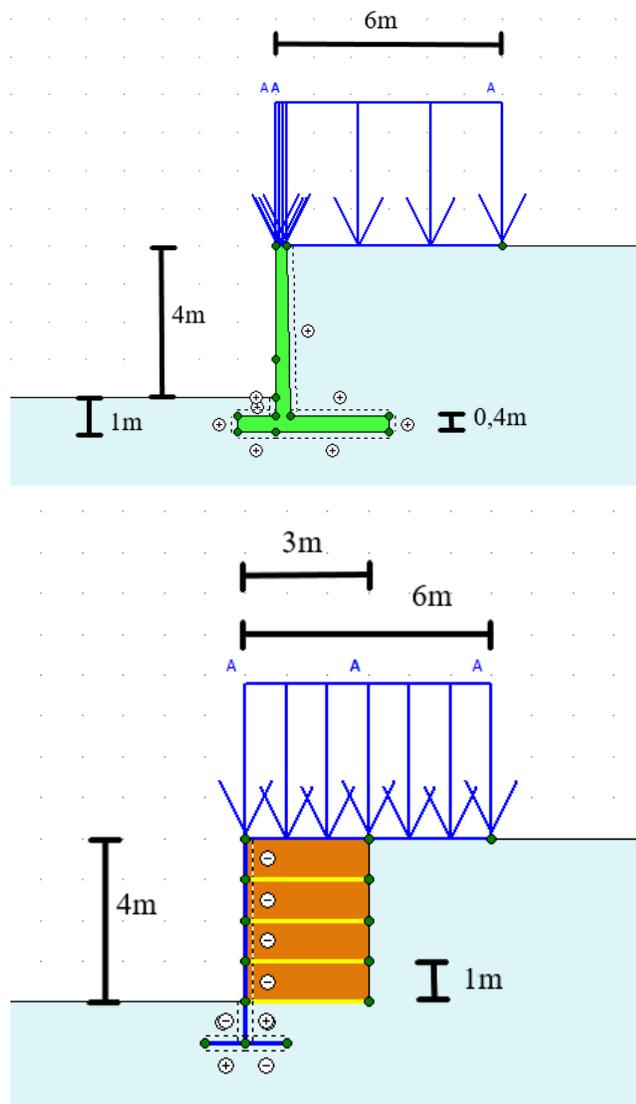
Por fim, foram coletados os deslocamentos em pontos diferentes ao longo dos muros com a finalidade de compará-los. É possível analisar a modelagem nas figuras 5 e 6.

Figura 4 – Muro de flexão e muro de solo reforçado com geossintético modelado 9m .



Fonte: Autor (2022).

Figura 5 – Muro de flexão e muro de solo reforçado com geossintético modelado 4m.

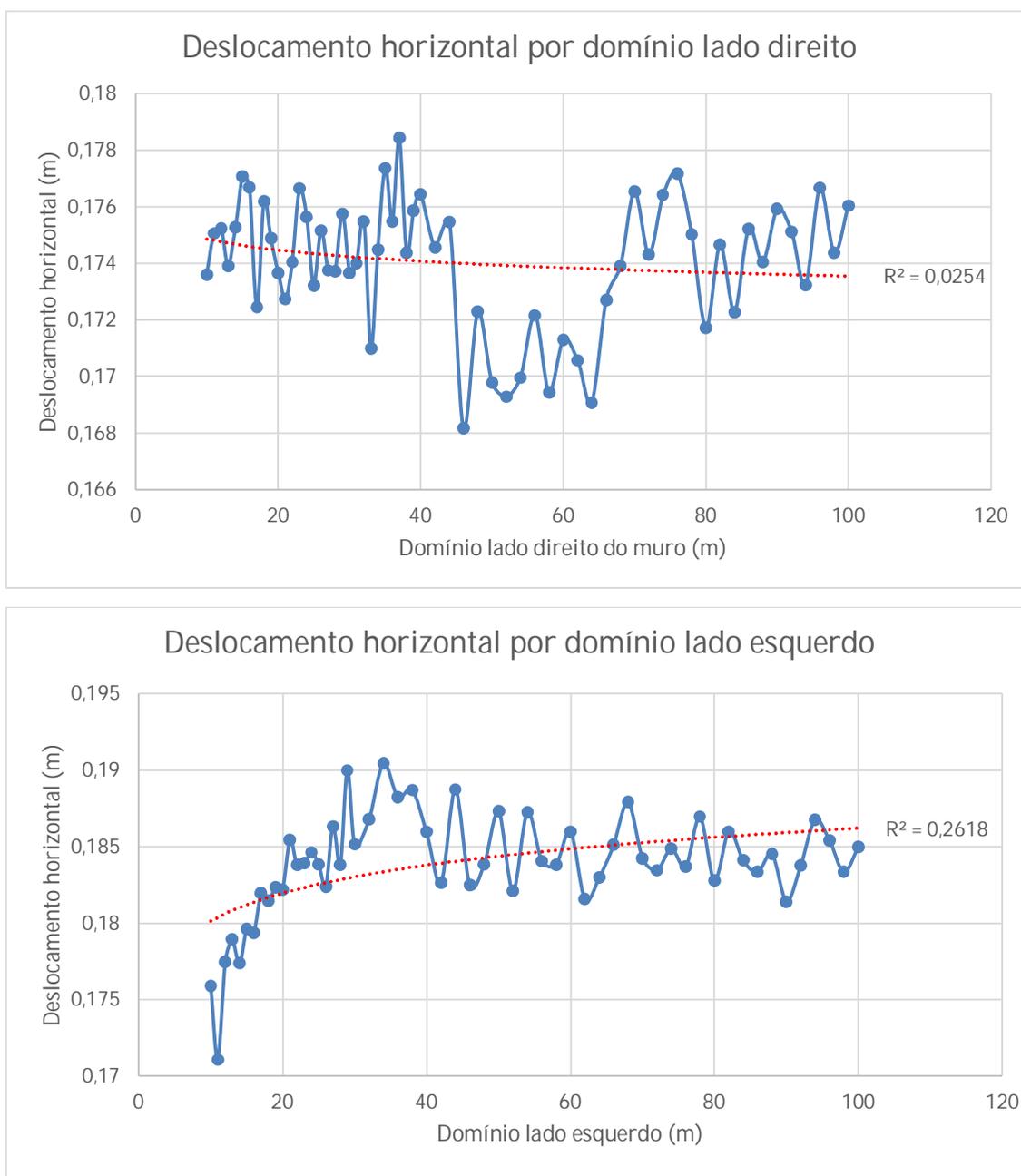


Fonte: Autor (2022).

Após a realização das modelagens foi realizado uma calibração para encontrar o domínio que melhor se adequava para a obtenção dos dados.

Para o muro flexão foram obtidos os dados mostrados na figura 7.

Figura 6 – Deslocamento horizontal do muro de flexão.

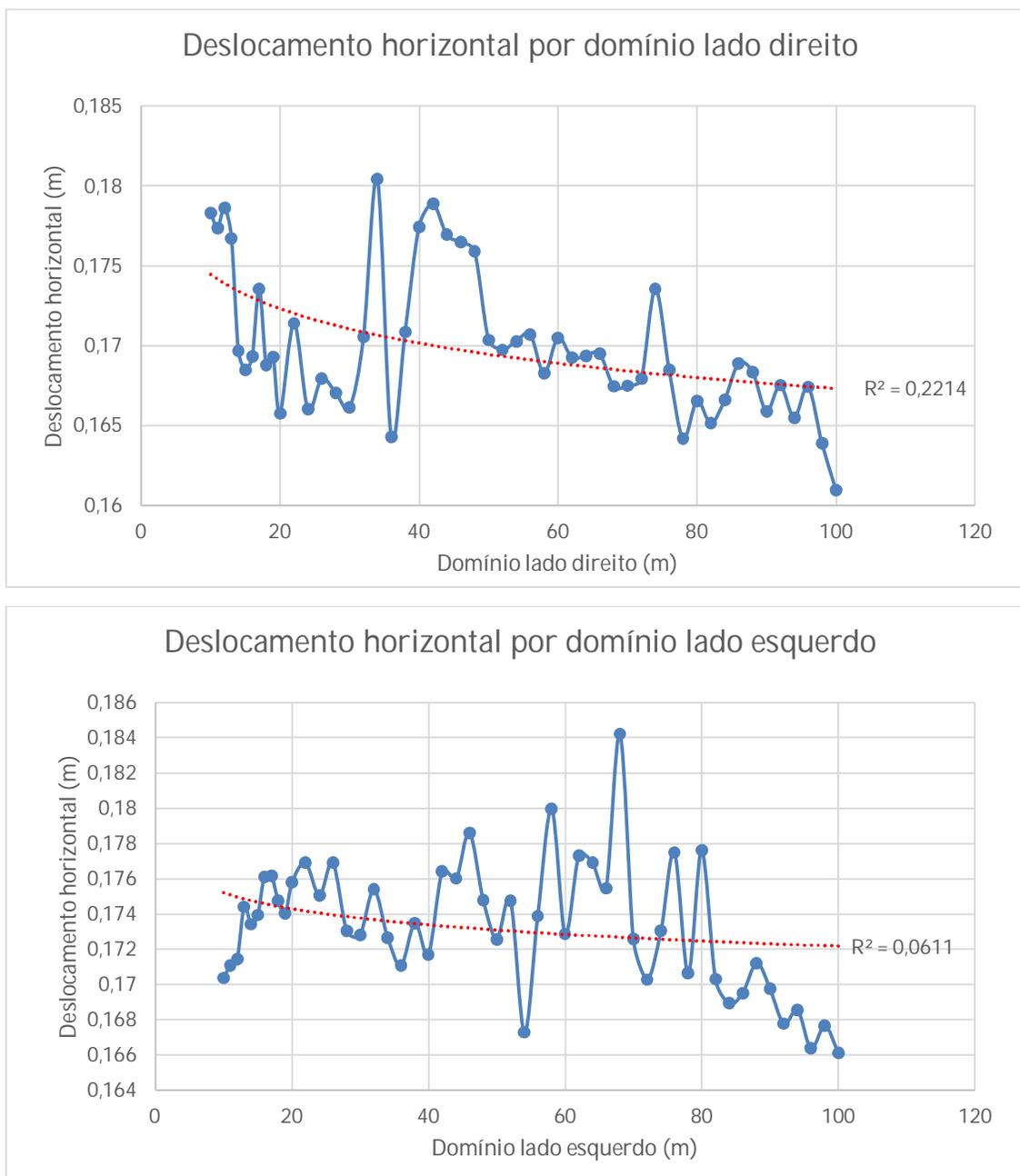


Fonte: Autor (2022).

Para esse muro foi adotado um domínio de 45m, para os dois lados. Pois a partir desse ponto o domínio tende a convergir.

Para o MSRG foram obtidos os dados mostrados na figura 8.

Figura 7 – Deslocamento horizontal MSRGR.

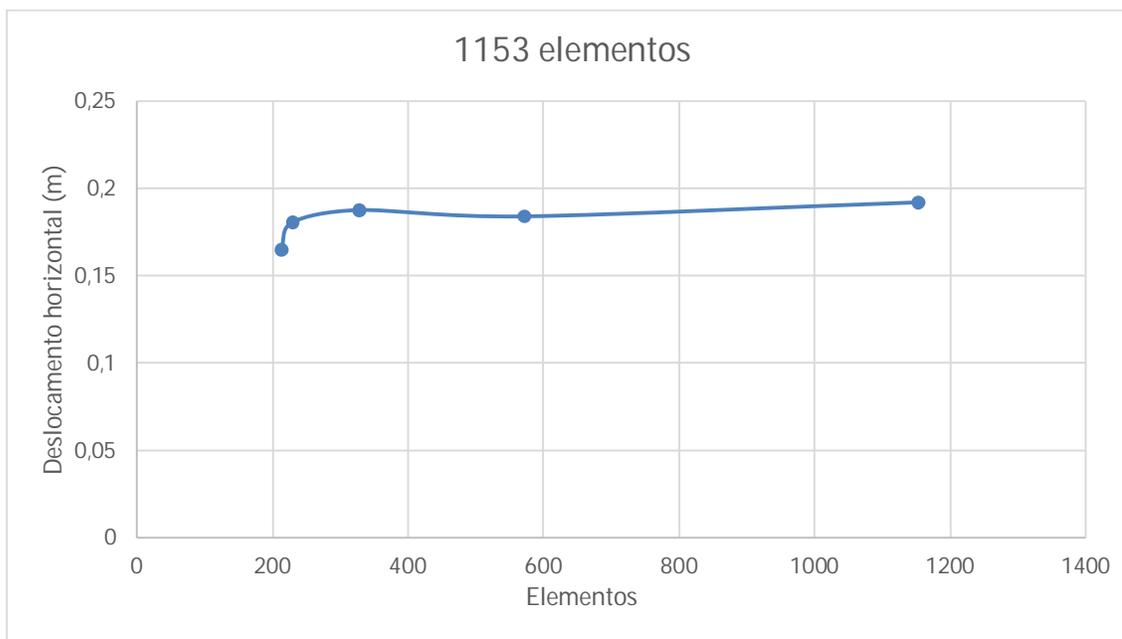


Fonte: Autor (2022).

Para esse muro foi adotado um domínio de 45m para o lado esquerdo e 50 para o lado direito. Uma vez que é a partir deles tendia a convergir.

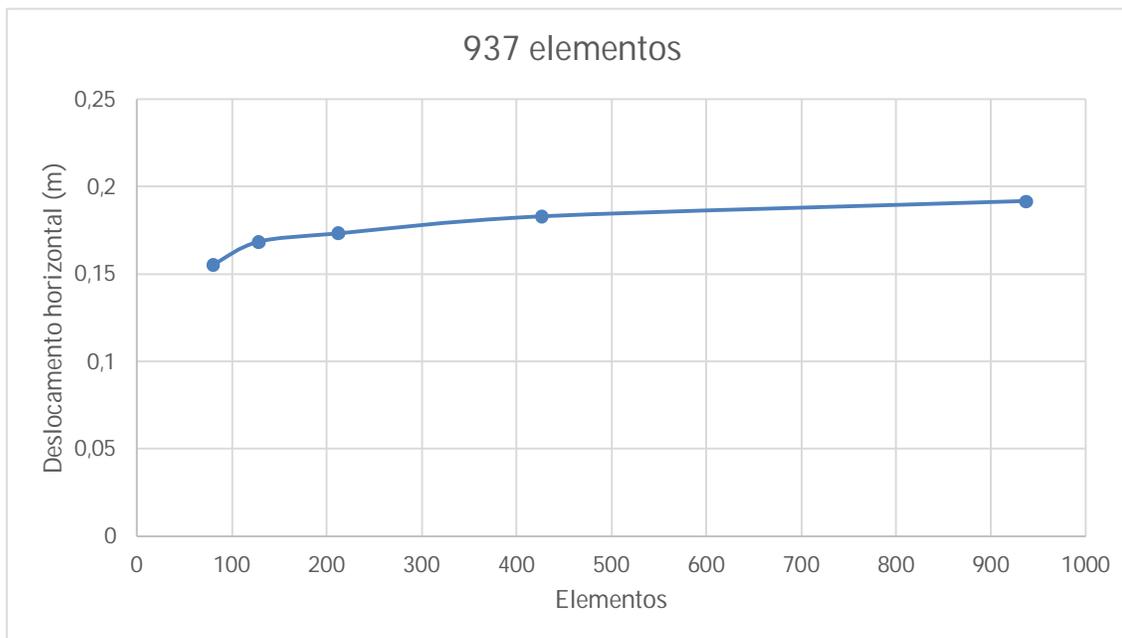
Em seguida, foi realizada a calibração com relação ao refino da malha que seria usada no software. Para ambos os muros foi adotado o refino máximo os dados podem ser vistos na figura 9 e 10.

Figura 8 – Deslocamento horizontal por elemento MSRG.



Fonte: Autor (2022).

Figura 9 – Deslocamento horizontal por elemento muro de flexão.

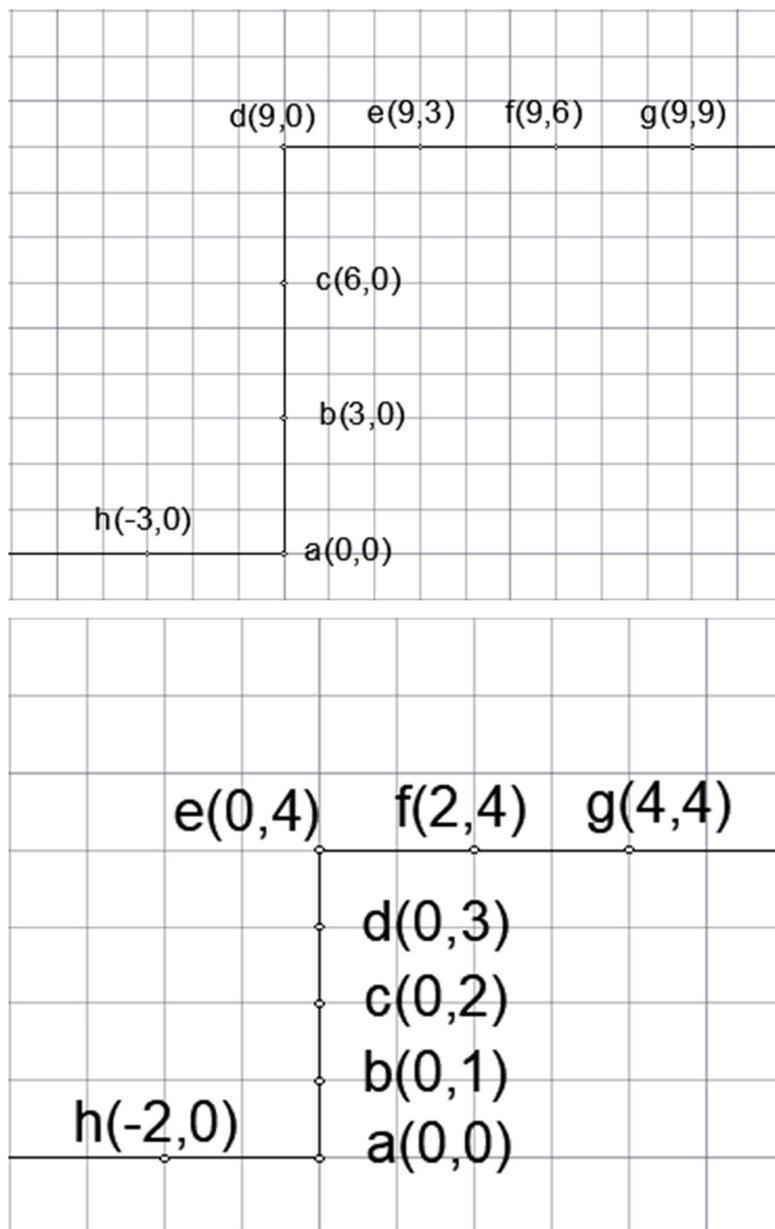


Fonte: Autor (2022).

Como visto nos gráficos, no refino máximo é onde os dados coletados tendem a apresentar valores mais constantes. Dessa forma, o refino máximo foi o escolhido para todos os modelos usados.

Em seguida, foram escolhidos pontos para serem coletados os deslocamentos, eles estão explicitados na figura 11

Figura 10 – Localização dos pontos analisados 9 e 4 metros.

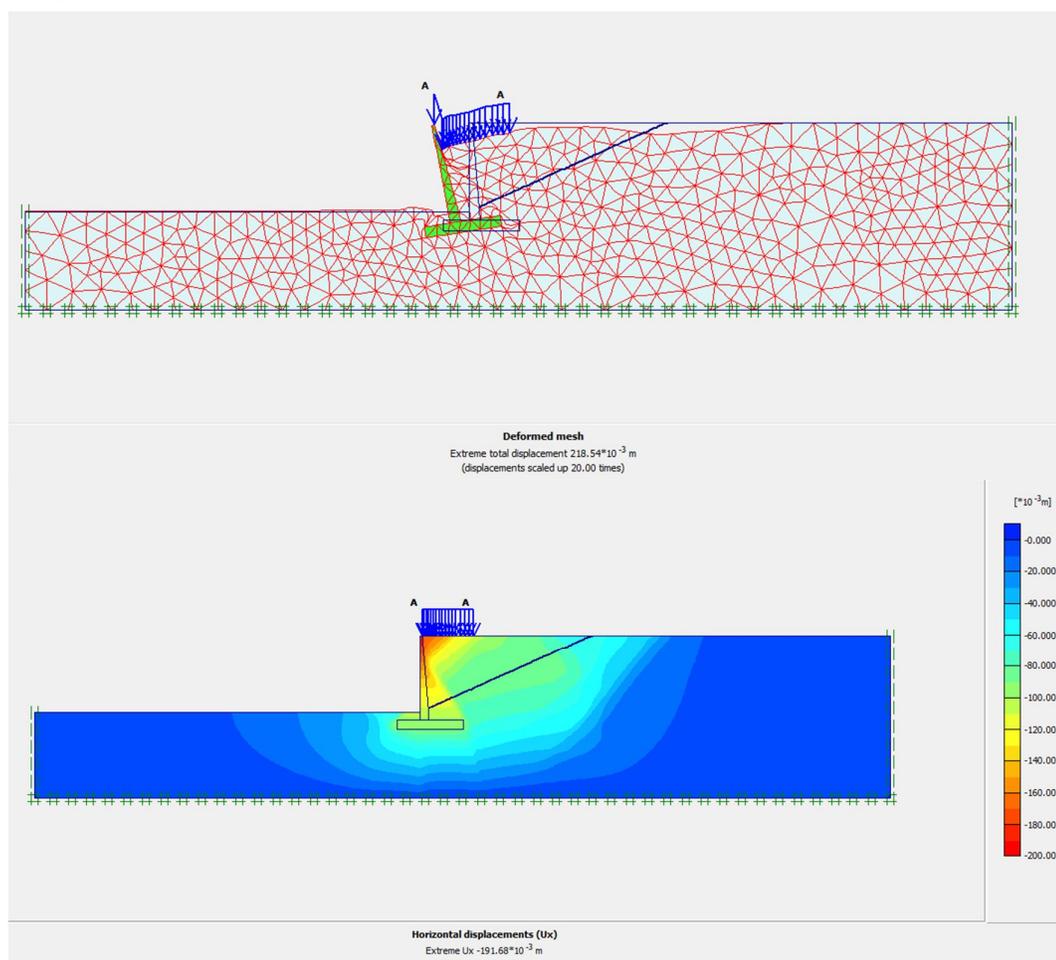


Fonte: Autor (2022).

4 RESULTADOS

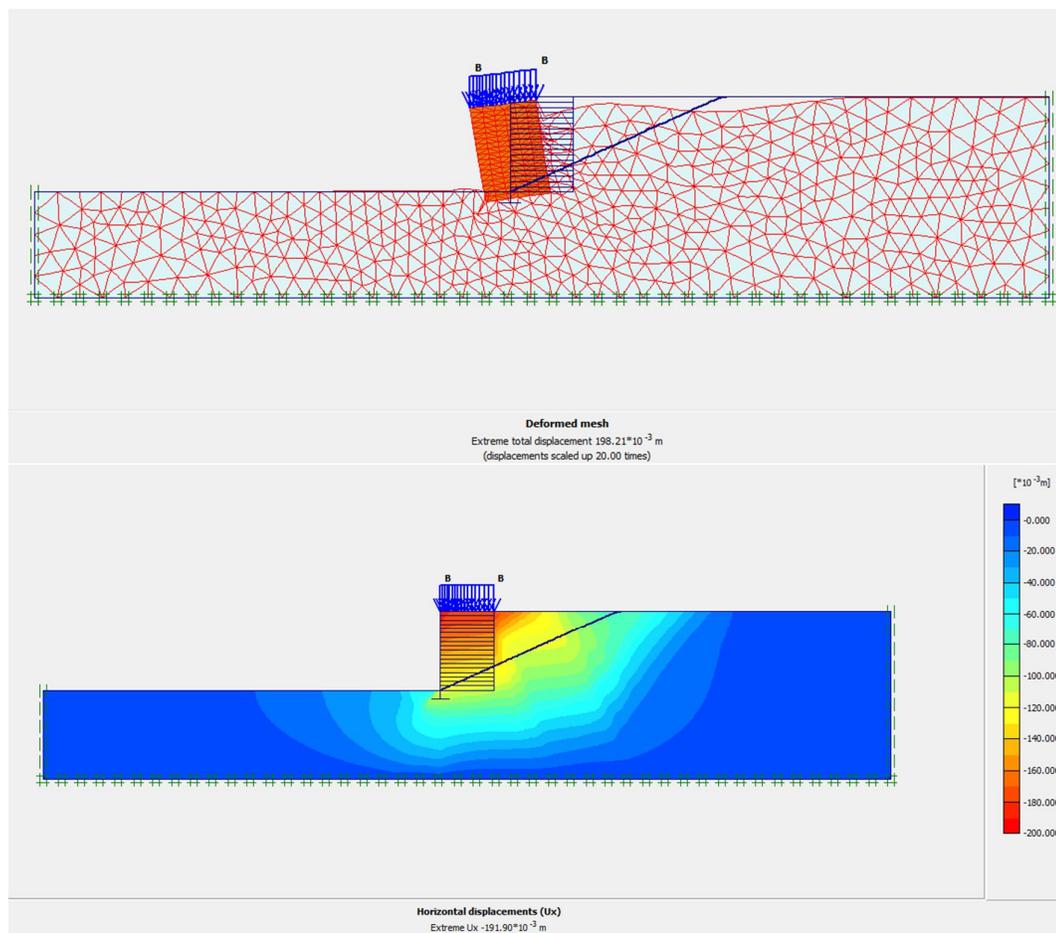
Após a realização das calibrações dos modelos, posicionamento dos pontos, dimensionamento e modelagem das estruturas foram obtidos as deformações totais máximas e deslocamentos horizontais máximos encontrados para os muros são apresentados nas figuras a seguir

Figura 11 – Deformação máxima e deslocamento horizontal máximo do muro de flexão 9m.



Fonte: Autor (2022).

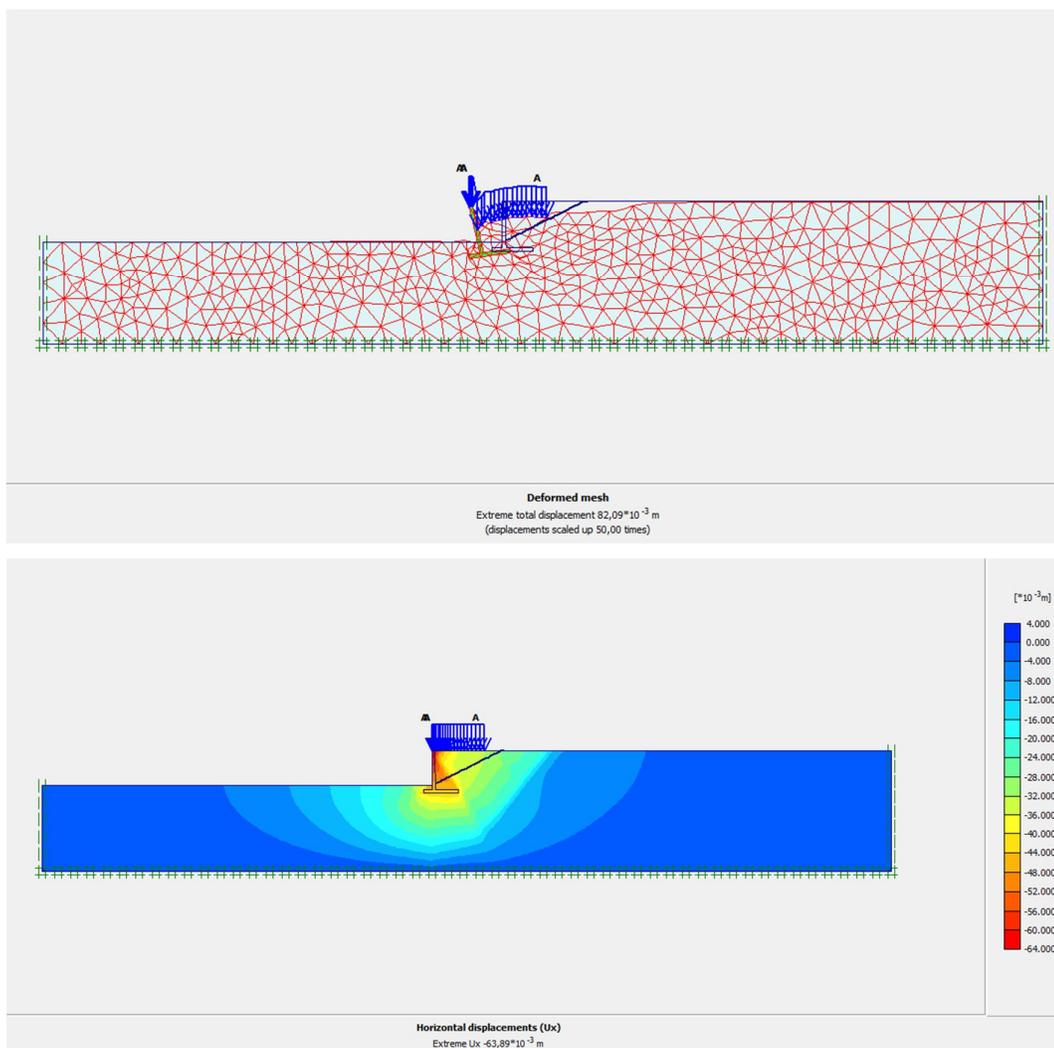
Figura 12 – Deformação máxima e deslocamento horizontal máximo do muro de solo reforçado com geossintético 9m.



Fonte: Autor (2022).

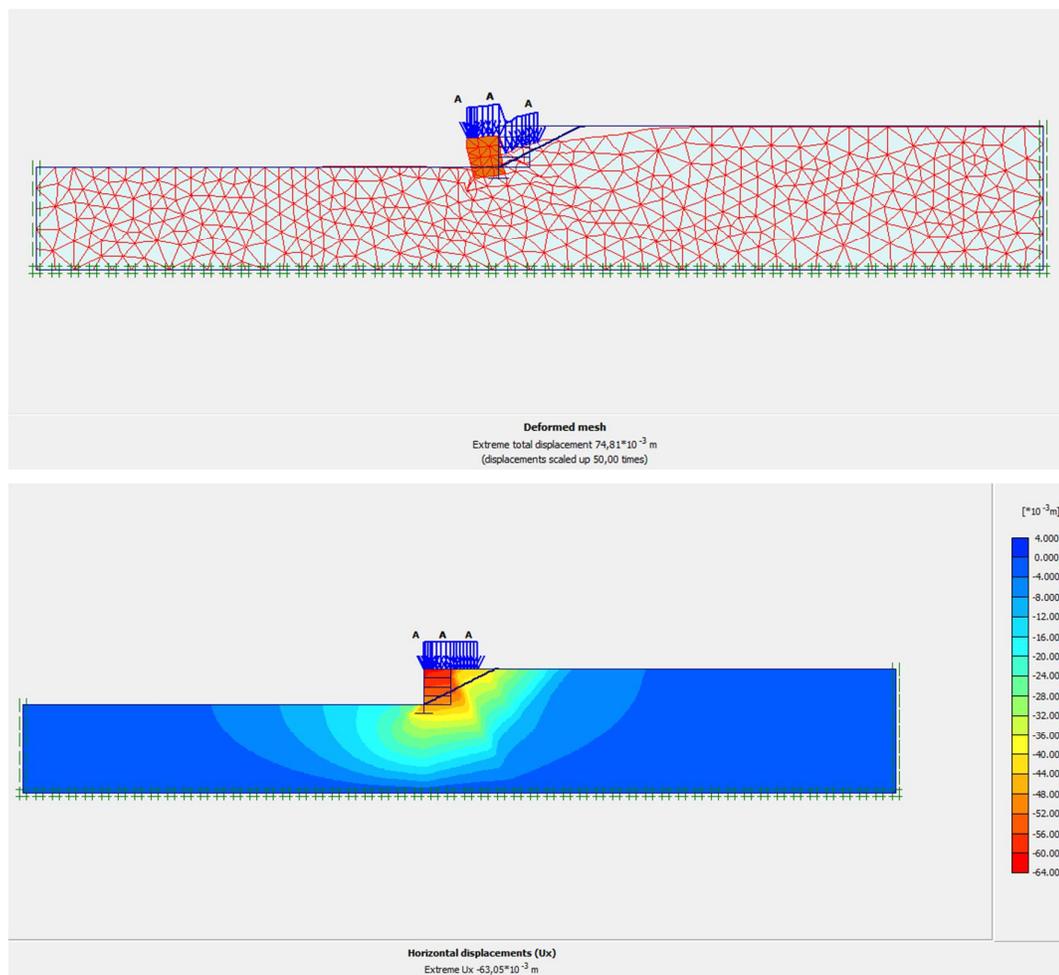
É possível observar que, de acordo com os resultados obtidos no software usado, o muro de flexão apresentou menores valores para a deformação total máxima com relação ao MSRG. Além disso, o deslocamento horizontal máximo foi bastante semelhante nos dois métodos construtivos diferentes. Esses resultados não são um problema para o MSRG, uma vez que ele é capaz de resistir a essas deformações sem colapsar e de forma mais eficiente que outros tipos de muros de contenção.

Figura 13 – Deformação máxima e deslocamento horizontal máximo do muro de flexão 4m.



Fonte: Autor (2022).

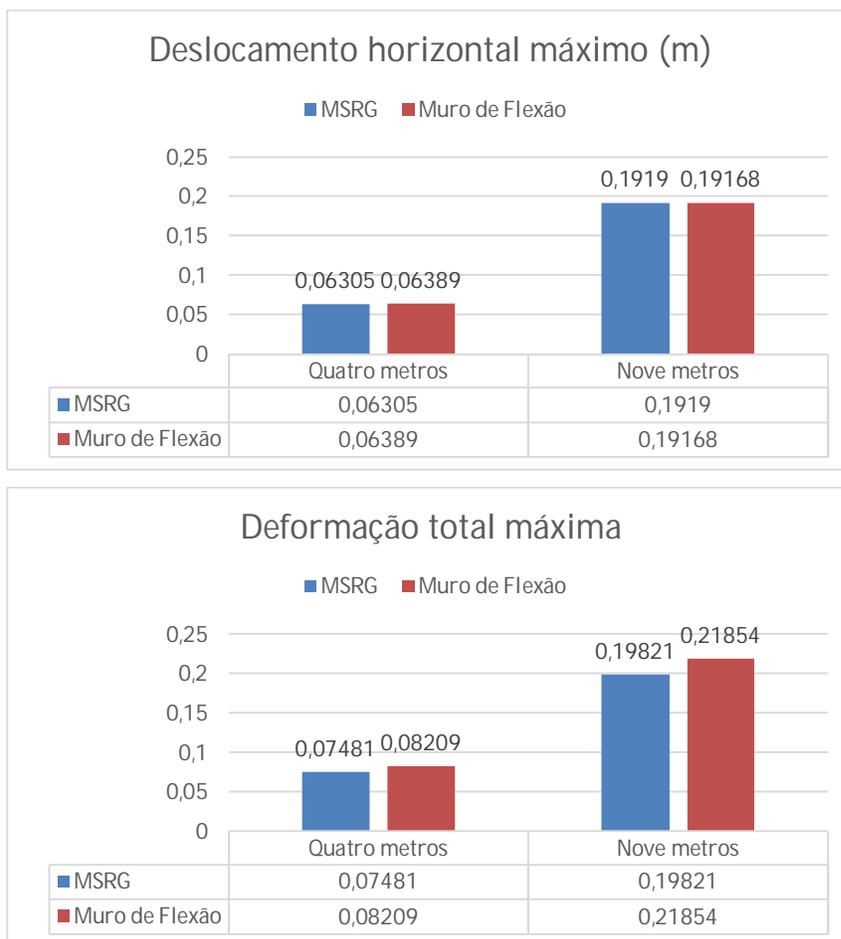
Figura 14 – Deformação máxima e deslocamento horizontal máximo do muro de solo reforçado com geossintético 4m.



Fonte: Autor (2022).

Assim como no caso anterior onde a altura era de 9m, a deformação máxima se encontra no MSRSG. Além disso, o deslocamento horizontal de ambas as estruturas de contenção também foi bastante próximo. Para uma melhor visualização dos resultados encontrados foram montados os gráficos a seguir.

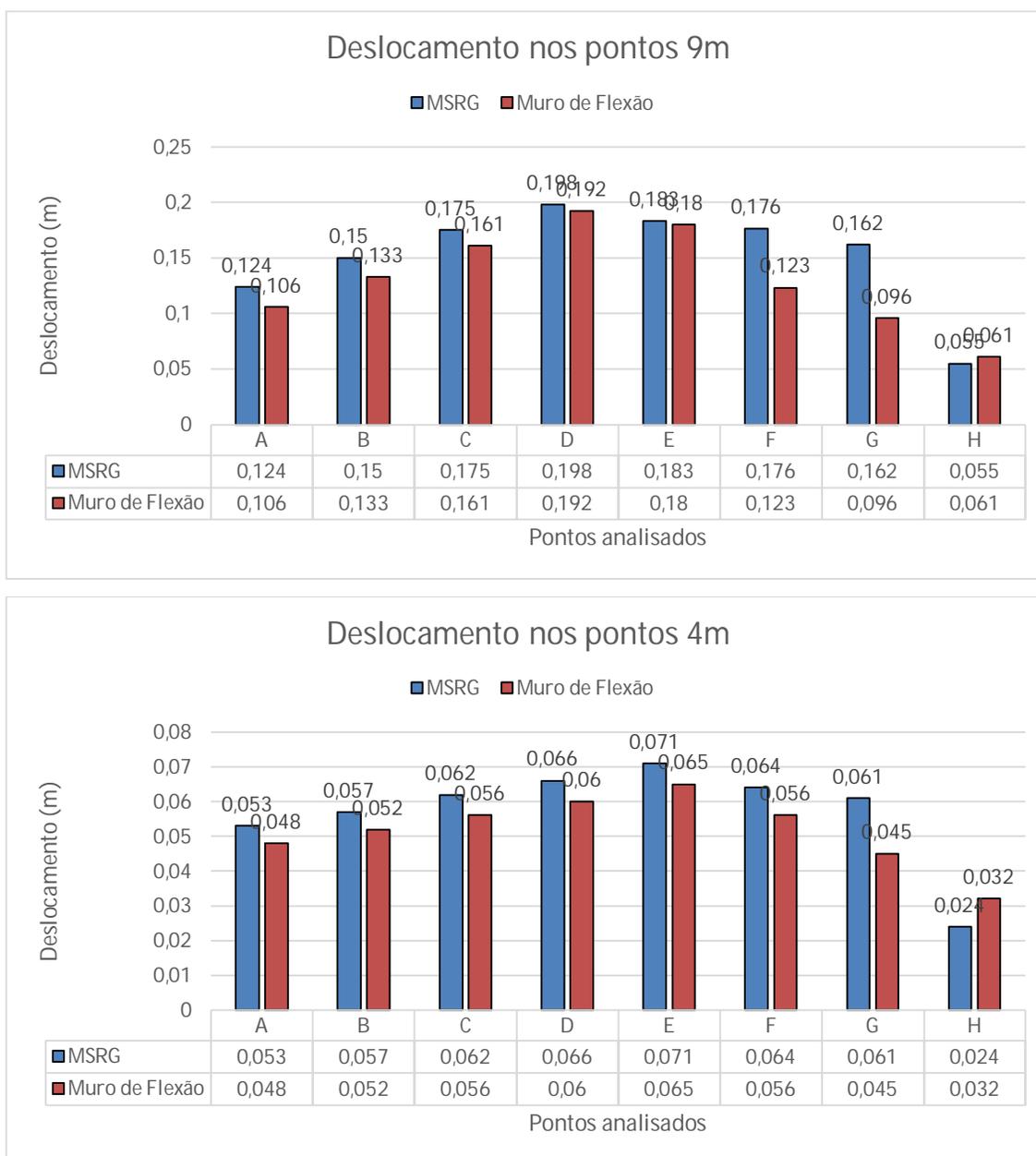
Gráfico 1 – Deslocamento horizontal máximo e deformação total máxima.



Fonte: Autor (2022).

O gráfico 1 explicita a dificuldade que o muro de flexão tem em absorver e dissipar as cargas que são impostas nele. Dessa forma, a deformação total máxima apresentada nos muros de flexão é maior. Enquanto o MSRG consegue distribuir essas forças de forma mais eficiente, gerando assim, uma deformação total máxima menor.

Gráfico 2 – Deslocamentos dos pontos 9m e 4m.

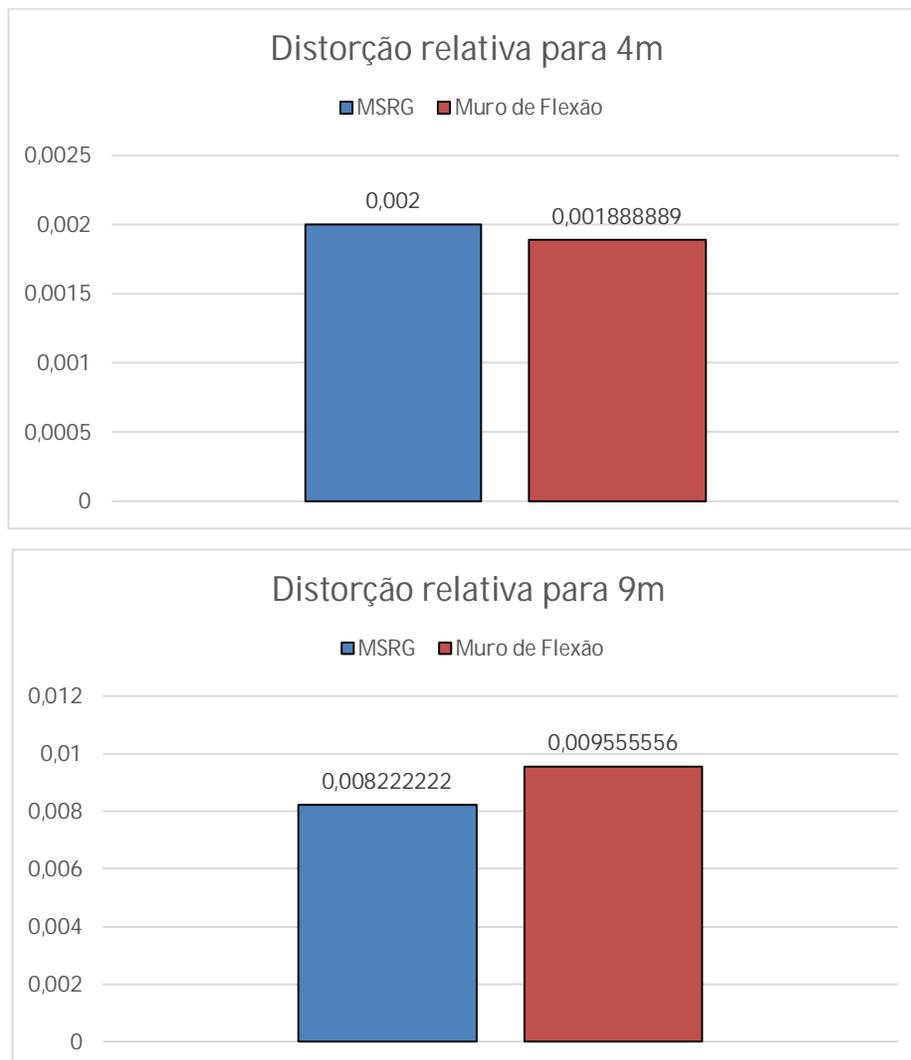


Fonte: Autor (2022).

Para ambas as alturas, 7 dos 8 pontos analisados o muro de solo reforçado com geossintético apresentou valores de deslocamento maiores que os encontrados no muro de flexão.

Tanto na tabela 5 quanto na 6 é visto que o muro de solo reforçado com geossintético apresentou maiores deslocamentos nos pontos que se encontravam ao longo da estrutura e menores nos pontos Hs que se encontravam na região inferior próximo à base da construção.

Gráfico 3 – Distorção relativa para 4m e 9m.



Fonte: Autor (2022).

A distorção relativa é calculada da seguinte maneira:

$$Distorção\ relativa = (D_{topo} - D_{base})/H$$

Onde D_{topo} é o deslocamento no topo do muro, D_{base} o deslocamento na base e H a altura da estrutura de contenção.

Com a análise realizada no gráfico 3 é possível compreender que mesmo o MSRG tendo maiores deslocamentos ele apresenta maior segurança para alturas mais elevadas, uma vez que quanto maior a distorção relativa maior será o ângulo de inclinação que a estrutura apresentará após sua construção. Isso ocorre pela inclusão do material geossintético como elemento de reforço do material de aterro, conseqüentemente é propiciada uma redistribuição

global das tensões e deformações. Esse é um dos motivos pelo qual o MSRG é bastante recomendado para grandes taludes.

Logo, foi possível concluir que, para esses casos, o muro de flexão contém menos deslocamentos que o muro de solo reforçado com geossintético na maioria dos pontos analisados. O deslocamento horizontal máximo mostra uma diferença muito pequena para todas as alturas. Também foi visto que o muro de contenção que apresenta menor distorção relativa para maiores alturas foi o MSRG, enquanto que, para menores elevações, o muro de flexão é quem se destaca nesse aspecto. Além disso, a deformação máxima é menor no muro de solo reforçado com geossintético.

5 CONCLUSÃO

Esse trabalho realizou uma análise 2D deslocamento-deformação apresentados por dois tipos de muro em diferentes alturas, sendo o muro de solo reforçado com geossintético e o muro convencional de flexão. Para isso, foi realizado o dimensionamento de ambos os muros e modelado no software de elementos finitos Plaxis. Com isso, foram obtidas as seguintes conclusões.

- Os muros de solo reforçado com geossintético podem apresentar mais deslocamentos horizontais que o muro de flexão, em razão de sua menor rigidez global, no entanto sua deformação máxima é menor tanto para as contenções de 9 m quanto as de 4 m.
- Tanto as estruturas de 9 m quanto as de 4 m tendem a apresentar valores de deslocamento horizontal máximo semelhantes.
- O MSRG apresenta menor distorção relativa, para nove metros de altura, enquanto que para quatro metros o muro de flexão é que contém os menores valores. Dessa forma, apoiando a recomendação de Gerscovich, Robson e Bernadete (2019) do muro de flexão para até 5 m e a do MSRG para alturas maiores que 5 m tanto por motivos mecânicos quanto financeiros.

REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12553:2002: Geossintéticos - Terminologia**. Rio de Janeiro: ABNT. 2002. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ESTABILIDADE DE ENCOSTAS**. NBR 11682. Rio de Janeiro, 2009.

AZEVEDO, Á. F. M. **MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**. Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003.

BARROS, P. L. D. A. **OBRAS DE CONTENÇÃO: Manual Técnico**. São Paulo: Maccaferri, 2013.

BECKER, L. **MUROS E TALUDES DE SOLO REFORÇADO**. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica, 2015.

DAS, B. M. **FUNDAMENTOS DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA**. Tradução da 7 edição norte-americana, São Paulo: Cengage Learning, 2011.

EHRlich, M.; BECKER, L. **MUROS E TALUDES DE SOLO REFORÇADO: PROJETO E EXECUÇÃO. 1º EDIÇÃO**, São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

PALMEIRA, E. M. **GEOSSINTÉTICOS EM GEOTECNIA E MEIO AMBIENTE**. São Paulo: oficina de textos, 2018.

FIGUEIREDO, P. C. M. D. **INFLUÊNCIA DO ESPAÇAMENTO VERTICAL ENTRE REFORÇOS NOS DESLOCAMENTOS DE SOLO REFORÇADO COM GEOSSINTÉTICO PARA CONDIÇÕES DE MUROS PORTANTES**. Orientador: Prof. Dr. Yuri Daniel Jatoba Costa. 2020. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, NATAL/RN, 2020.

GERSCOVICH, D. M. S. **APOSTILA ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO, EMPUXOS DE TERRA**. Faculdade de Engenharia/UERJ. Departamento de Estruturas e Fundações. Rio de Janeiro, 2010.

GERSCOVICH, D.; ROBSON SARAMAGO; BERNADETE RAGONI DANZIGER. **CONTENÇÕES: TEORIA E APLICAÇÕES EM OBRAS**. [s.l.] Oficina de Textos, 2019.

GONÇALVES, Julio Fernandes. **ESTUDO NUMÉRICO DO COMPORTAMENTO DE MUROS DE SOLO REFORÇADO COM GEOSSINTÉTICO**. Orientadora: Maria Eugenia Gimenez Boscov. 2016. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

KOERNER, R. M. **DESIGNING WITH GEOSYNTHETICS. 5. ED.** New York, 1999.

MARCHETTI, O. **MUSROS DE ARRIMO**. 1. ed. São Paulo: Blucher. 2007. 141p.

MITCHELL, J. K.; VILLET, W. C. B.; BOARD, N. R. C. U. S. T. R. **REINFORCEMENT OF EARTH SLOPES AND EMBANKMENTS**. National Highway Research Program Report, 1987.

VERTEMATTI, J. C. **MANUAL BRASILEIRO DE GEOSSINTÉTICOS**. São Paulo: Edgard Blucher, 2004.