

SUBMETIDO 23/12/2021

APROVADO 09/02/2022

PUBLICADO ON-LINE 15/04/2022

PUBLICADO 10/10/2023

EDITOR ASSOCIADO
Andre Luis Christoforo

DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id6576>

ARTIGO ORIGINAL

Análise paramétrica das variáveis de dimensionamento de muros de arrimo tipo “L” em concreto armado

RESUMO: O muro de arrimo consiste em uma estrutura construída para promover a contenção de taludes e, conseqüentemente, evitar a erosão, restabelecer a segurança de um maciço de terra e até mesmo recuperar áreas degradadas ou em processo de degradação. Além disso, geralmente, as estruturas de contenção são onerosas. Portanto, conhecer a influência das variáveis de dimensionamento aumenta a sensibilidade do projetista para que este alcance soluções otimizadas, as quais proporcionam maior segurança estrutural juntamente com a redução de custos com materiais e mão de obra e de tempo de execução da obra. Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo analisar a influência de diversas propriedades no dimensionamento de muros de arrimo de flexão em concreto armado, com formato “L”. Para tornar factível a análise das influências, foi construída uma planilha no software Microsoft Office Excel e realizaram-se análises paramétricas da altura do muro, do peso específico do solo, do ângulo de atrito do solo, da resistência característica à compressão do concreto, da largura do muro e da espessura da laje da base. A análise da sensibilidade foi feita analisando os fatores de segurança ao tombamento e à translação e também as áreas de aço no muro e na laje da base. Em suma, os parâmetros que provocaram maior influência no comportamento do muro de arrimo foram o peso específico e o ângulo de atrito do solo. Especificamente quanto ao ângulo de atrito do solo, verifica-se uma forte correlação geral com as verificações de segurança e com o dimensionamento da área de aço. À medida que esse parâmetro aumenta, a área de aço é minimizada e a segurança, maximizada.

Palavras-chave: análise de sensibilidade; análise paramétrica; concreto armado; estruturas de contenção; muro de arrimo de flexão.

Parametric analysis of the variables of dimensioning in the L-type retaining wall in reinforced concrete

ABSTRACT: The retaining wall consists of a structure built to promote the containment of slopes and, as a consequence, prevent erosion, restore the

 Daniel Rocha Geraldo ^[1]

 Renato Silva Nicoletti ^{[2]*}

[1] drg.rocha@gmail.com

Departamento de Engenharia Civil,
Centro Universitário Paulista (UNICEP),
Campus São Carlos, Brasil

[2] renato_nicoletti@hotmail.com

Departamento de Engenharia
Civil, Universidade Federal de
São Carlos (UFSCar), Brasil

*Autor para correspondência.

security of a mass of land and even recover degraded areas or in the process of degradation. In addition, containment, structures are often expensive. Therefore, knowing the influence of the dimensioning variables increases the designer's sensitivity so that he can reach optimized solutions, which provide greater structural safety together with the reduction of costs in materials, labor, and execution time. In this context, the present work aims to analyze the influence of different properties on the design of reinforced concrete flexural retaining walls, with an "L" shape. To make the analysis of influences feasible, the spreadsheet was built in the Microsoft Office Excel software and parametric analysis of the wall's height, the soil's specific weight, the soil's friction angle, the characteristic compressive strength of the concrete, the wall width, and the base slab thickness. The sensitivity analysis was carried out by analyzing the safety factors for tipping and translation, as well as the steel areas in the wall and the base slab. In short, the parameters that had the greatest influence on the behavior of the retaining wall were the specific weight and friction angle of the soil. Specifically regarding the friction angle of the soil, one verifies a strong general correlation between the safety checks and the dimensioning of the steel area. As this parameter increases, the steel area minimizes and the safety maximizes.

Keywords: parametric analysis; sensitivity analysis; reinforced concrete; containment structures; bending retaining wall.

1 Introdução

O muro de arrimo consiste em uma estrutura construída para promover a contenção de taludes e aterros e, conseqüentemente, evitar a erosão, restabelecer a segurança de um maciço de terra e até mesmo recuperar áreas degradadas e/ou em processo de degradação.

A estrutura do muro de arrimo tem como característica principal a existência de uma parede vertical ou levemente inclinada, apoiada em uma fundação rasa ou profunda. Ele pode ser construído em alvenaria (pedras ou tijolos), em concreto (simples ou armado) e com elementos especiais, tais como pneus, sacos e madeiras.

Quando mal dimensionado, o muro de arrimo pode colocar a segurança de edificações próximas em risco, além de comprometer todo o aterro. Conforme a Associação Nacional de Medicina do Trabalho (ANAMT), uma das principais causas de acidentes no trabalho na construção civil tem sido o soterramento (ANAMT, 2019).

Além disso, as estruturas de contenção são onerosas. Portanto, conhecer a influência das variáveis de dimensionamento aumenta a sensibilidade do projetista para que este alcance soluções otimizadas, as quais proporcionam maior segurança estrutural juntamente com a redução de custos com materiais e mão de obra e de tempo de execução da obra.

No mais, vale mencionar que muros de arrimo são estruturas atípicas, cujo dimensionamento não é contemplado pelas matrizes curriculares da maioria dos cursos de graduação em engenharia civil. Assim, este artigo constitui uma referência para nortear a concepção e análise desse tipo de estrutura.

Nesse contexto, o presente artigo tem o objetivo de estudar a influência das principais variáveis presentes no dimensionamento de muros de arrimo em concreto

armado: altura do muro, peso específico e ângulo de atrito do solo, resistência característica do concreto, espessura do muro e geometria da laje.

Quanto à estrutura do trabalho, a seção 2 do artigo apresenta uma breve revisão bibliográfica, expondo a tendência das pesquisas no tema. Por sua vez, a seção 3 detalha a metodologia do trabalho. Especificamente, ela apresenta as equações de pré-dimensionamento para muros de arrimo tipo “L” em concreto armado, as variáveis e variações da análise paramétrica e as etapas de dimensionamento. Já a seção 4 apresenta e discute, separadamente, a influência de cada variável parametrizada. Por fim, a seção 5 resume as principais conclusões do trabalho.

2 Estado da arte

Acerca dos trabalhos nacionais recentes que estudaram muros de arrimo, Rocha (2016) comparou a variação de altura para muros de arrimo com e sem contrafortes, projetados em concreto armado. Ele concluiu que os muros clássicos (sem contraforte) com alturas acima de 5 metros são economicamente inviáveis devido ao aumento significativo das dimensões dos elementos estruturais, proporcionado principalmente pela necessidade de aumento da rigidez do elemento para atender ao estado limite de serviço de deformação excessiva. Nessa situação, recomenda-se a utilização dos muros de arrimo com contraforte, os quais possuem maior rigidez.

Pinto e Costa (2020) estudaram o dimensionamento de um muro de arrimo em concreto armado com sapatas corridas. Os autores adotaram dados fictícios para o solo a fim de contemplar todas as fases que envolvem o dimensionamento do muro de arrimo e de sua respectiva fundação. Entre as verificações, a que se mostrou mais crítica foi a de dimensionamento da sapata corrida à flexão.

Bezerra Júnior (2019) comparou, em termos técnicos e econômicos, soluções com muro de arrimo em concreto armado e muro de arrimo em gabiões. Na situação hipotética adotada, ambas as concepções atenderam aos critérios de segurança. Nas verificações de segurança, o autor verificou que o muro em concreto armado apresentou maior fator de segurança nas verificações ao tombamento e à translação, porém, apresentou maiores solicitações por flexão na fundação. Em relação ao custo da estrutura, o muro de arrimo em gabião apresentou um custo total 46% maior em relação ao muro em concreto armado.

Torres, Curado e Silva (2019) realizaram estudos numéricos e econômicos sobre dois tipos de estruturas de contenção: muro à flexão de concreto armado e muro de solo reforçado com geossintéticos. O estudo constatou vantagens técnico-econômicas para o muro de solo reforçado com geossintéticos em relação ao muro à flexão de concreto armado. Esse estudo também expôs a influência dos parâmetros do solo nos aspectos técnicos e econômicos da solução dimensionada.

De modo geral, nos últimos cinco anos, a tendência de pesquisa tem sido a avaliação das soluções técnicas existentes, a fim de otimizar o dimensionamento por meio da minimização de custos e simultânea maximização dos fatores de segurança (FS). Inclusive, nesse sentido, há o trabalho de Ferreira *et al.* (2020), que desenvolveram um aplicativo para dispositivos móveis para o dimensionamento otimizado de muros de arrimo por gravidade.

Paralelamente, têm-se ainda pesquisas dedicadas ao estudo do comportamento do solo. Nesse contexto, destaca-se o trabalho de Costa (2021), o qual analisou a influência de reforços geossintéticos. A autora verificou que o emprego de reforço proporciona

maior estabilidade global e local da estrutura, possibilidade de maiores alturas para o aterro e a redução de custos do muro de arrimo em determinados casos.

Na literatura internacional, destacam-se, entre os trabalhos recentes, as pesquisas de Ferdous *et al.* (2018), Kalemci *et al.* (2020), Kim *et al.* (2020), Kalemci e Ikizler (2020) e Kaveh, Akbari e Hosseini (2022).

Ferdous *et al.* (2018) estudaram muros de arrimo modulares com seções celulares e tubulares de GFRP (Polímeros Reforçados com Fibra de Vidro), preenchidas com concreto. Os autores, por meio de modelagens numéricas, avaliaram o efeito do enchimento de concreto, do módulo de elasticidade longitudinal, da forma geométrica e tamanho e da seção e do seu espaçamento. Entre os parâmetros analisados, o enchimento das seções vazadas com concreto foi o que mostrou maior influência no comportamento do muro. Ele proporcionou aumento da rigidez à flexão e evitou fenômenos como esmagamento local, tendência de ovalização e flambagem.

Kalemci *et al.* (2020) desenvolveram um algoritmo de otimização para o projeto de muros de arrimo com chave de cisalhamento. Os autores utilizaram o software *open source* do algoritmo GWO do MATLAB. Tal algoritmo mostrou-se eficiente para o projeto desse tipo de muro.

Kim *et al.* (2020) estudaram a utilização de um sistema de parede dupla de concreto pré-fabricado para melhorar a produtividade da construção de muros de arrimo. Os pesquisadores apresentaram recomendações de procedimentos para a face de projeto e construção desse tipo de muro. Além disso, eles apontaram diversas vantagens em relação ao muro de arrimo convencional em concreto armado, entre elas maior segurança, controle de qualidade e redução do tempo de construção.

Kalemci e Ikizler (2020) desenvolveram e aplicaram um algoritmo de otimização, denominado Rao-3, visando à otimização do peso de muros de arrimo cantiléver em concreto armado. O desempenho do algoritmo proposto foi avaliado com dois exemplos de projeto.

Kaveh, Akbari e Hosseini (2022) empregaram um algoritmo meta-heurístico baseado em população, denominado Otimização de Geração de Plasma (PGO), para o projeto otimizado de estruturas de muros de arrimo em concreto armado, tipo cantiléver. O fator de otimização considerado foi o custo da construção. O algoritmo foi testado em dois exemplos práticos e demonstrou eficiência.

No mais, quanto aos principais livros que fundamentam o projeto e execução de muros de arrimo, nacionalmente, destacam-se Moliterno (1994), Marchetti (2008) e Gerscovich, Saramago e Danziger (2019). No estrangeiro, por sua vez, vale ressaltar os livros de Skinner (2003), Coleman (2009) e Brooks e Nielsen (2010).

3 Metodologia

A presente seção descreve a metodologia empregada para a realização do trabalho. Especificamente, a seção 3.1 apresenta as equações para o pré-dimensionamento de muros de arrimo tipo “L” em concreto armado, bem como as variáveis e variações da análise paramétrica. Por sua vez, a seção 3.2 expõe as etapas de dimensionamento e equações pertinentes.

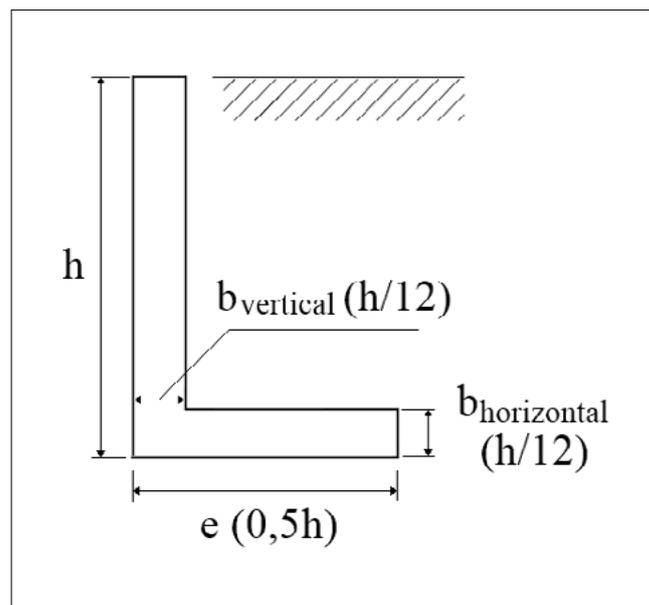
3.1 Pré-dimensionamento

Com o objetivo de estudar a influência das principais variáveis presentes no projeto de muros de arrimo em concreto armado, o presente trabalho realizou uma análise paramétrica em um muro de arrimo de flexão com perfil “L”. Os seguintes parâmetros foram estudados:

- Altura do muro (h);
- Peso específico do solo (γ_s);
- Ângulo de atrito do solo (ϕ);
- Resistência característica à compressão do concreto (f_{ck});
- Espessura da base ($b_{horizontal}$);
- Espessura do muro ($b_{vertical}$).

A Figura 1 ilustra a seção transversal avaliada e as equações utilizadas para pré-dimensionar os valores centrais das variáveis parametrizadas.

Figura 1 ▶
Pré-dimensionamento de muro de arrimo de flexão com perfil tipo “L”.
Fonte: elaborada pelos autores



O princípio da análise paramétrica fundamentou-se em definir valores padrões para todas as variáveis, os quais foram mantidos fixos enquanto um único parâmetro foi alterado em relação aos outros. Com isso, foi possível associar os resultados ao parâmetro variado. A Tabela 1 expõe os valores padrões das variáveis estudadas, sendo e a largura da base do muro.

Tabela 1 ▶
Valores padrões da análise paramétrica.
Fonte: dados da pesquisa

h [m]	γ_s [kN/m ³]	Φ [°]	f_{ck} [MPa]	$b_{vertical}$ [m]	$b_{horizontal}$ [m]	e [m]
3,00	21	30	30.000	0,25	0,25	1,25

Os parâmetros padrões foram adotados dentro dos limites citados em literatura. Para a altura (h), Rocha (2016) afirmou que muros de arrimo de flexão em concreto armado são viáveis para alturas de até 5 m, no geral. Por esse motivo, a altura do muro foi variada entre 1 m e 5 m e, como valor default, foi adotado o valor padrão intermediário de 3 m.

Por sua vez, o peso específico do solo (γ_s) não apresenta grande variabilidade entre os solos existentes. Por esse motivo, foi adotado o valor padrão médio de 21 kN/m³ (PINTO, 2006). Vale ressaltar que o peso específico do solo, em estado natural, é limitado a 25 kN/m³, porém, nas análises foram analisados valores de até 27 kN/m³ a fim de contemplar, indiretamente, eventuais sobrecargas para efeito de estudo.

Para o ângulo de atrito (ϕ) adotou-se o valor fixo de 30°. Esse é um valor médio para solos não coesivos, constituídos de grãos arredondados de areia (DAS, 2007). Porém, foram realizadas variações de 20° a 40° para observar a influência do ângulo de atrito nas verificações de dimensionamento do muro.

Já para o concreto armado, o concreto de classe C30 foi utilizado como padrão, o qual tem resistência característica à compressão de 30 MPa e é o mais comum nas obras cotidianas. As variações contemplaram desde o concreto C20 até o concreto C40.

Por fim, as dimensões do muro foram determinadas com base nas recomendações de Domingues (1997). Ele sugeriu que as espessuras do muro ($b_{vertical}$) e da laje ($b_{horizontal}$) fossem iguais a, aproximadamente, $h/12$. Portanto, para uma altura padrão de 3 m, os resultados indicaram espessuras de 0,25 m.

No total, 32 muros de arrimo em concreto armado, divididos em 6 grupos diferentes, foram dimensionados e analisados. Para tanto, com o intuito de automatizar o dimensionamento e facilitar a análise de resultados, foi desenvolvida uma planilha no software Microsoft Office Excel. A Tabela 2 detalha as propriedades dos muros analisados neste trabalho. As células em destaque apresentam os parâmetros variados.

Tabela 2 ▼

Variáveis dos muros que foram estudados.

Fonte: dados da pesquisa

#ID	Grupo	H [m]	γ_s [kN/m ³]	Φ [°]	f_{ck} [kN/m ²]	$b_{horizontal}$ [m]	$b_{vertical}$ [m]	e [m]
1	1	1,00	21	30	30.000	0,08	0,08	0,55
2		1,50	21	30	30.000	0,13	0,13	0,83
3		2,00	21	30	30.000	0,17	0,17	1,10
4		2,50	21	30	30.000	0,21	0,21	1,38
5		3,00	21	30	30.000	0,25	0,25	1,65
6		3,50	21	30	30.000	0,29	0,29	1,93
7		4,00	21	30	30.000	0,33	0,33	2,20
8		4,50	21	30	30.000	0,38	0,38	2,48
9		5,00	21	30	30.000	0,42	0,42	2,75
10	2	3,00	15	30	30.000	0,25	0,25	1,65
11		3,00	18	30	30.000	0,25	0,25	1,65
12		3,00	21	30	30.000	0,25	0,25	1,65
13		3,00	24	30	30.000	0,25	0,25	1,65
14		3,00	27	30	30.000	0,25	0,25	1,65

continua

								conclusão
15		3,00	21	20	30.000	0,25	0,25	1,65
16		3,00	21	25	30.000	0,25	0,25	1,65
17	3	3,00	21	30	30.000	0,25	0,25	1,65
18		3,00	21	35	30.000	0,25	0,25	1,65
19		3,00	21	40	30.000	0,25	0,25	1,65
20		3,00	21	30	20.000	0,25	0,25	1,65
21		3,00	21	30	25.000	0,25	0,25	1,65
22	4	3,00	21	30	30.000	0,25	0,25	1,65
23		3,00	21	30	35.000	0,25	0,25	1,65
24		3,00	21	30	40.000	0,25	0,25	1,65
25		3,00	21	30	30.000	0,15	0,25	1,65
26	5	3,00	21	30	30.000	0,25	0,25	1,65
27		3,00	21	30	30.000	0,35	0,25	1,65
28		3,00	21	30	30.000	0,45	0,25	1,65
29		3,00	21	30	30.000	0,25	0,15	1,65
30	6	3,00	21	30	30.000	0,25	0,25	1,65
31		3,00	21	30	30.000	0,25	0,35	1,65
32		3,00	21	30	30.000	0,25	0,45	1,65

3.2 Etapas de dimensionamento

O dimensionamento do muro de arrimo de flexão em concreto armado foi dividido em três etapas:

- 1) Verificação da segurança ao tombamento;
- 2) Verificação da segurança à translação;
- 3) Dimensionamento da armadura de flexão.

Para o dimensionamento completo do muro, ainda são necessárias análises da tensão admissível do solo e da estabilidade global do maciço. Porém, elas não fazem parte do escopo do presente trabalho.

O principal esforço externo que solicita o muro de arrimo é o empuxo de terra, o qual consiste numa ação provocada pelo maciço terroso com os elementos estruturais em contato com ele. Nesse contexto, diz-se que o empuxo é ativo quando ele causa um afastamento entre o muro e o solo; e passivo quando há aproximação entre o paramento e o solo.

O empuxo ativo por metro de muro (E) foi calculado pela Teoria de Rankine, por meio da Equação 1. Por sua vez, o empuxo passivo foi desconsiderado por estar a favor dos fatores de segurança. Nos trabalhos de Kalemci *et al.* (2020) e Kalemci e Ikizler (2020), a teoria de Rankine foi utilizada para o levantamento da pressão lateral

do solo no muro. Por sua vez, Kaveh, Akbari e Hosseini (2022) aplicaram as teorias de Rankine e Coulomb.

$$E_a = K_a \times h \times \lambda \times \frac{h}{2} \quad (1)$$

em que h é a altura do muro (sem considerar a altura da laje), K_a é o coeficiente de empuxo ativo e γ_s é o peso específico do solo.

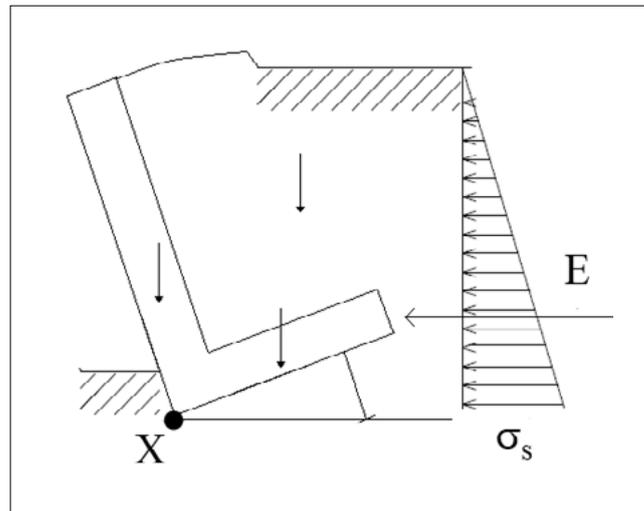
A Equação 2 denota a verificação da segurança ao tombamento (Figura 2).

$$F S_{\text{tombamento}} = \frac{M_{\text{rest}}}{M_{\text{tomb}}} > 1,4 = F S_{\text{limite}} \quad (2)$$

Figura 2 ►

Ilustração do tombamento do muro de arrimo e identificação das principais variáveis envolvidas.

Fonte: elaborada pelos autores



Na Equação 2, M_{rest} e M_{tomb} são, respectivamente, o momento de restituição e de tombamento, calculados, respectivamente, pelas Equações 3 e 4.

$$M_{\text{tomb}} = E \cdot \frac{h}{3} = K_a \times \lambda_s \times \frac{h^6}{6} \quad (3)$$

$$M_{\text{rest}} = \sum_i P_i \times z_i \quad (4)$$

com E sendo o empuxo ativo; h , a altura do muro (sem considerar a altura da laje); K_a , o coeficiente de empuxo ativo; γ_s , o peso específico do solo; P_i , o peso de cada elemento do muro (laje, muro e terra sobre a laje); e z_i , a distância entre a resultante da força peso de cada elemento até o ponto X, de acordo com a Figura 2.

O coeficiente de empuxo ativo (K_a) é dependente do ângulo de atrito do solo (ϕ). Tal coeficiente é calculado pela Equação 5, conforme prescrito por Rankine (1857).

$$K_a = \tan^2\left(45 - \frac{\phi}{2}\right) \quad (5)$$

Por sua vez, a verificação da segurança à translação foi realizada pela Equação 6.

$$F S_{\text{translação}} = \frac{F_{\text{atrito}}}{E} > 1,4 = F S_{\text{limite}} \quad (6)$$

A força de atrito (F_{atrito}) foi calculada pela Equação 7, sendo μ o coeficiente de atrito entre o muro e o solo e P o peso total do muro. Vale ressaltar que foi considerado um coeficiente de atrito igual a 0,55, pois esse é um valor médio recomendado pela US Navy (1982). O fator de segurança mínimo contra a translação foi considerado como 1,4.

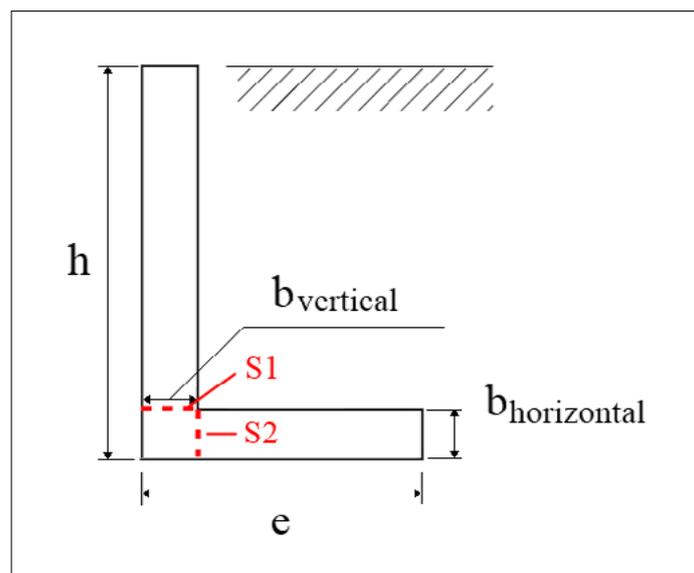
$$F_{\text{atrito}} = \mu \times P \quad (7)$$

Por fim, o dimensionamento da armadura longitudinal de reforço foi realizado nas seções mais críticas (S_1 e S_2), indicadas na Figura 3.

Figura 3 ►

Seções críticas para o dimensionamento da armadura de flexão.

Fonte: elaborada pelos autores



Os momentos nas seções S_1 e S_2 (M_{S1} e M_{S2} , respectivamente) foram calculados pelas Equações 8 e 9.

$$M_{S1} = M_{tomb} = K_a \times \gamma_s \times \frac{h^3}{6} \quad (8)$$

$$M_{S2} = b \times \left(\frac{\sigma_{s,min} \times c^2}{2} \right) + (\sigma_{S2} - \sigma_{s,min}) \times \frac{c^2}{6} - \gamma_s \times h \times \frac{c^2}{2} \quad (9)$$

em que b é o comprimento longitudinal do muro, admitido como unitário, $\sigma_{s,min}$ é a tensão mínima no solo, σ_{S2} é a tensão na seção S_2 e c é a largura da laje desconsiderando a espessura do muro (vide Figura 3).

As tensões $\sigma_{s,min}$ e σ_{S2} são calculadas pelas Equações 10 e 11, respectivamente.

$$\sigma_{s,min} = \frac{P}{b \times e} + \frac{6 \times M}{b \times e^2} \quad (10)$$

$$\sigma_{S2} = \frac{P}{b \times e} + \frac{12 \times M}{b \times e^3} \times y_{S2} \quad (11)$$

em que M é o momento fletor atuante no centro da sapata, calculado pela Equação 12; P é o peso total do muro; e é a largura da laje considerando a espessura do muro (vide Figura 3); e y_{S2} é a distância horizontal entre o centro de gravidade da laje e a seção S_2 .

$$M = P \times \left(\frac{e}{2} \right) + M_{tomb} + M_{rest} \quad (12)$$

Uma vez conhecidos os momentos, as áreas de aço foram determinadas com base nas recomendações da NBR 6118 (ABNT, 2014).

4 Resultados

Nesta seção são apresentadas e discutidas, de forma separada, a influência de cada variável parametrizada.

4.1 Influência da altura do muro

A Figura 4 ilustra a influência da altura do muro nos fatores de segurança ao tombamento e à translação. Observou-se que, seguindo as recomendações de pré-dimensionamento expostas na subseção 3.1, os fatores de segurança ao tombamento

Figura 4 ▼

Influência da altura do muro nos fatores de segurança ao tombamento e à translação.

Fonte: dados da pesquisa

e à translação foram atendidos em todos os casos e não foram influenciados pela altura do muro. Esse fato se deve à linearidade da distribuição de tensões e à simplificação de geometria e carregamento. Nesse contexto, conforme a altura aumenta, a força de empuxo e o peso sobre a contenção também se elevam. Consequentemente, ocorrem aumentos na resistência de interface e no momento estabilizante.

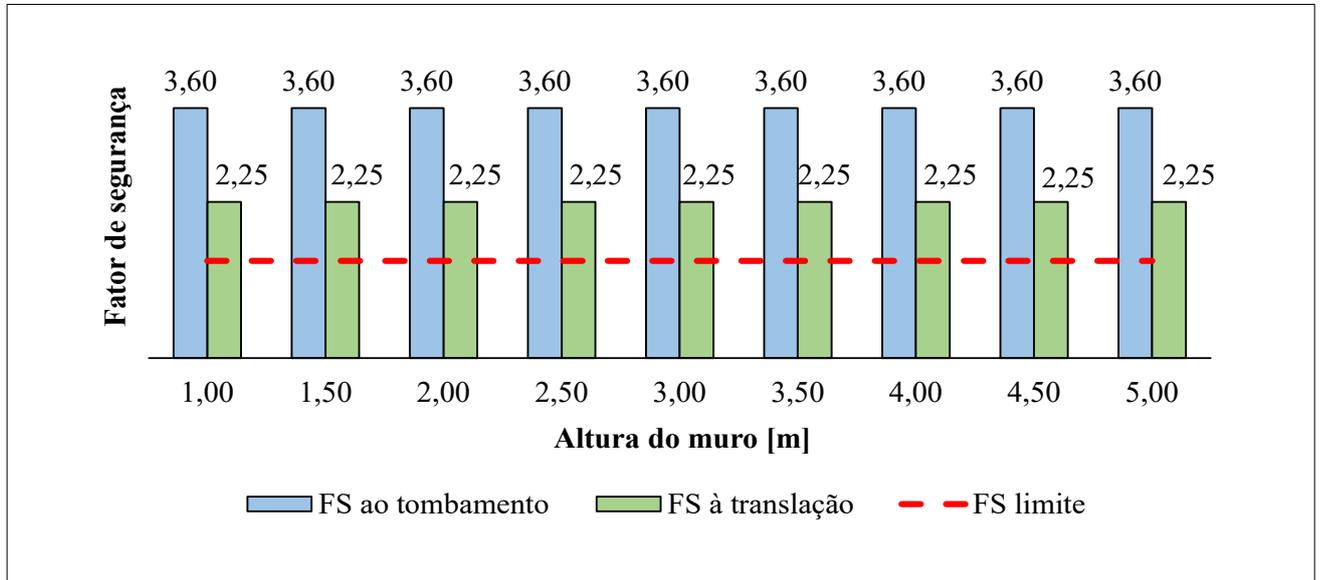
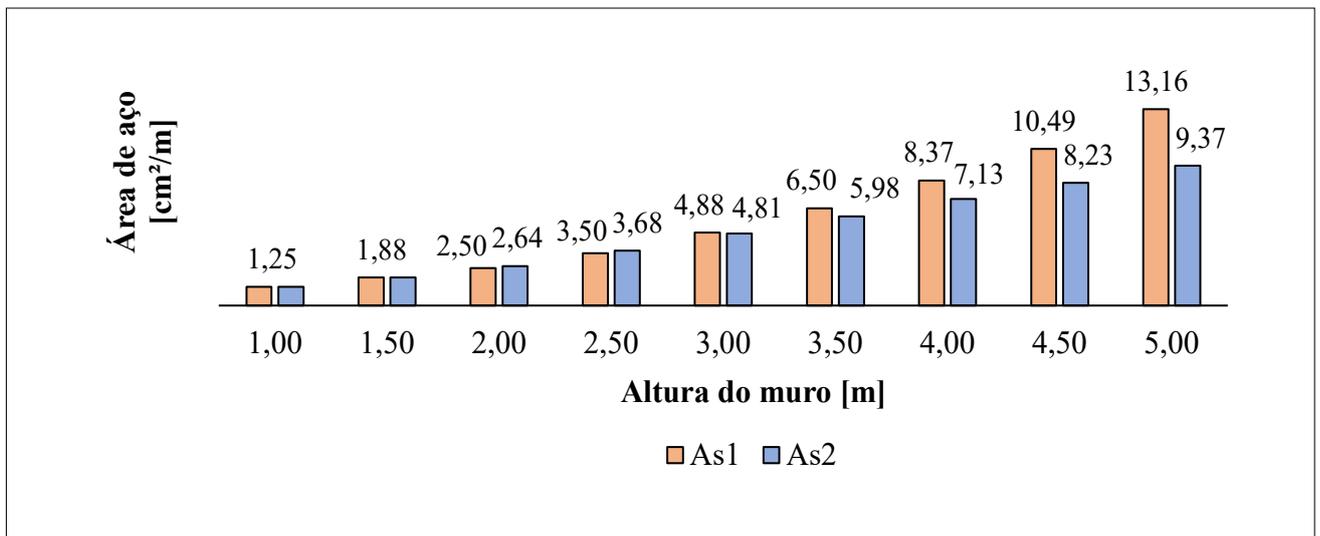


Figura 5 ▼

Influência da altura do muro nas áreas de aço de armadura longitudinal.

Fonte: dados da pesquisa

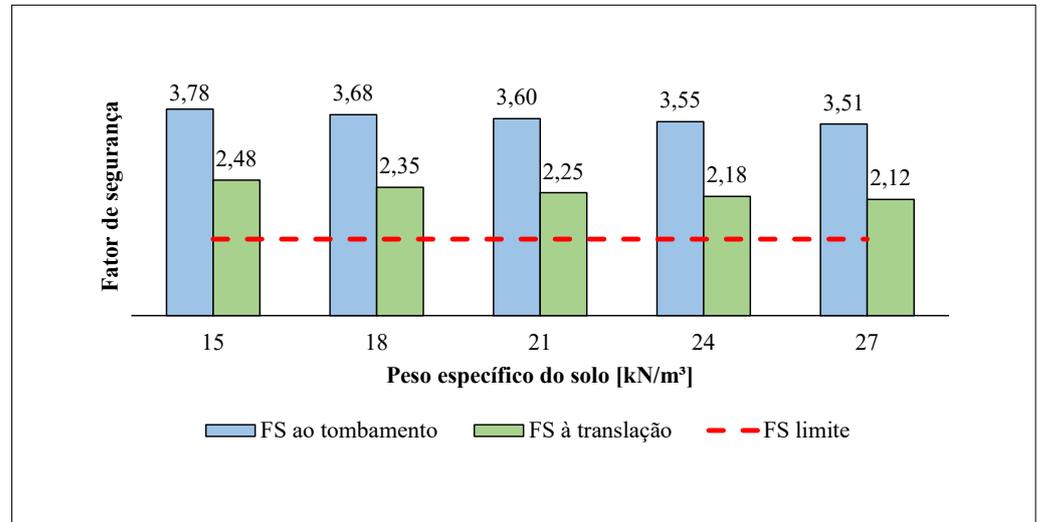
A Figura 5 demonstra a influência da altura do muro nas armaduras de flexão nas seções S_1 e S_2 . Observa-se que, na seção S_1 , a área de aço tem um aumento exponencial conforme a altura do muro varia de 1 a 5 metros. Por sua vez, na seção S_2 , nota-se um comportamento linear na área de aço frente a variações na altura do muro. Além disso, a área de aço A_{S1} torna-se maior que A_{S2} para muros com altura superior a 5 m. Esse comportamento está coerente com os resultados encontrados por Rocha (2016), os quais mostraram que muros de arrimo de flexão em concreto armado são viáveis, no geral, para alturas de, no máximo, 5 m. A partir dessa altura, passa-se a ter elevadas solicitações e consumo de aço.



4.2 Influência do peso específico do solo

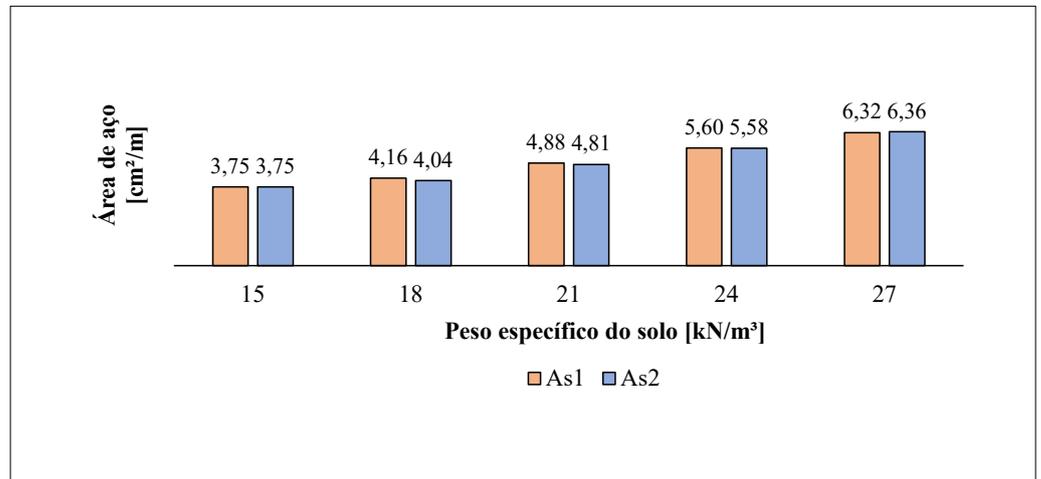
A Figura 6 expõe a influência do peso específico do solo nos fatores de segurança ao tombamento e à translação. Verifica-se que o aumento de 80% no peso específico do solo causou reduções de, aproximadamente, 9% no FS ao tombamento e de 17% no FS à translação.

Figura 6 ►
Influência do peso específico do solo nos fatores de segurança ao tombamento e à translação.
Fonte: dados da pesquisa



Já a Figura 7 ilustra a influência do peso específico do solo nas armaduras de flexão das seções S_1 e S_2 . Observa-se que, para um aumento de 80% no peso específico do solo, ambas as áreas A_{S1} e A_{S2} aumentaram, em torno de 59%.

Figura 7 ►
Influência do peso específico do solo nas áreas de aço de armadura longitudinal.
Fonte: dados da pesquisa



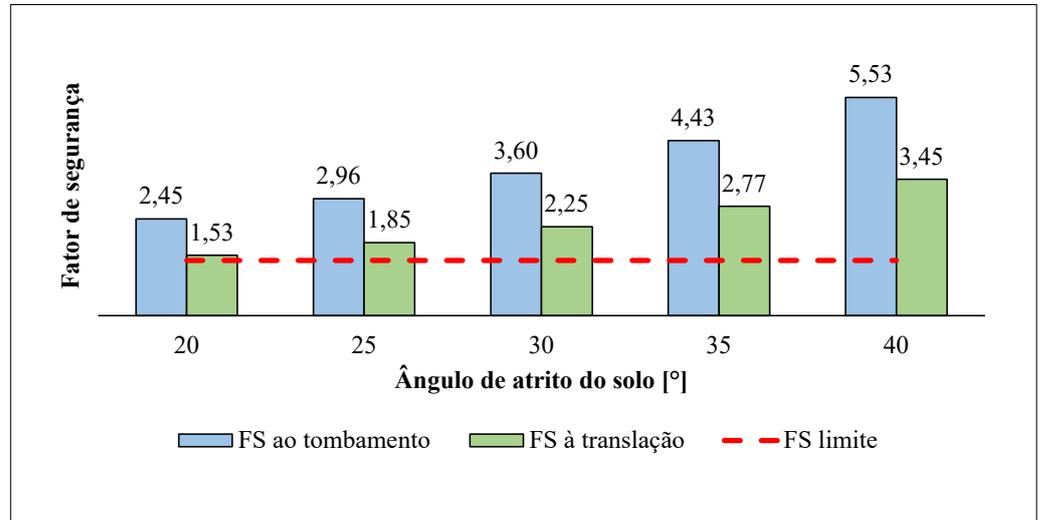
4.3 Influência do ângulo de atrito do solo

Na Figura 8 é apresentada a influência do ângulo de atrito do solo nos fatores de segurança ao tombamento e à translação. Nota-se significativa influência do ângulo de atrito em tais variáveis, causando variações praticamente exponenciais dos fatores de segurança. Quantitativamente, um aumento de 100% no ângulo de atrito do

solo acarretou aumentos de, aproximadamente, 125% nos fatores de segurança ao tombamento e à translação.

Figura 8 ▶

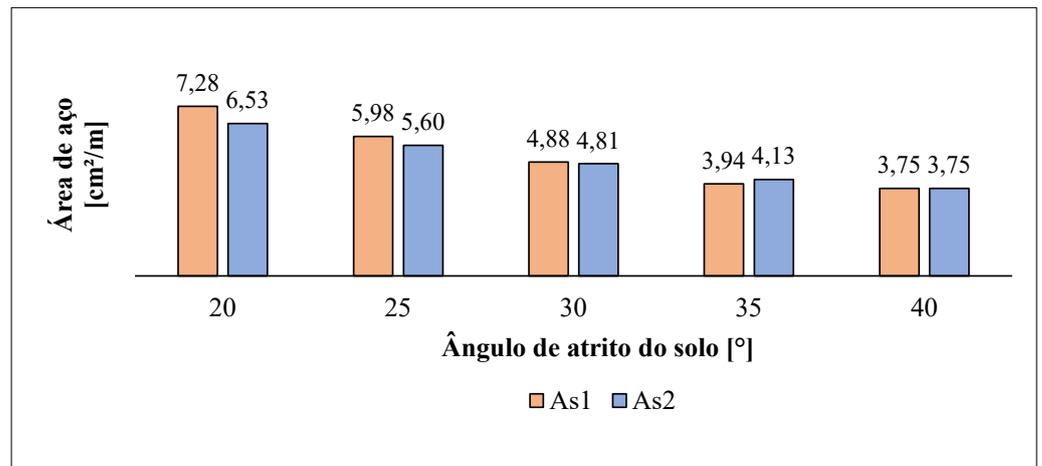
Influência do ângulo de atrito do solo nos fatores de segurança ao tombamento e à translação.
 Fonte: dados da pesquisa



A Figura 9 expõe a influência do ângulo de atrito do solo nas áreas de aço das seções S_1 e S_2 . A elevação do ângulo de atrito do solo em 100% causou reduções de 52% em A_{S1} e de 57% em A_{S2} .

Figura 9 ▶

Influência do ângulo de atrito do solo nas áreas de aço de armadura longitudinal.
 Fonte: dados da pesquisa



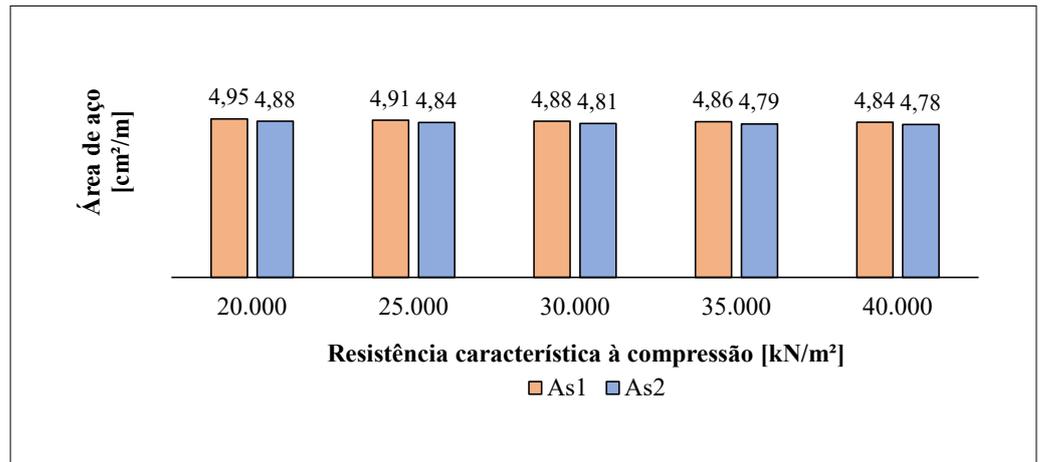
4.4 Influência da resistência característica à compressão do concreto

A resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}) não exerce nenhuma influência nos fatores de segurança. Eles dependem somente das propriedades do solo e da geometria do muro.

A Figura 10 (próxima página) ilustra a influência da resistência característica do concreto à compressão nas áreas de aço A_{S1} e A_{S2} . Verificou-se que a classe do concreto causou baixa influência nas áreas de aço. Quantitativamente, aumentos de 100% no f_{ck} do concreto causaram reduções de, aproximadamente, 1,4% nas áreas de aço.

Figura 10 ►

Influência da resistência característica à compressão nas áreas de aço de armadura longitudinal.
 Fonte: dados da pesquisa

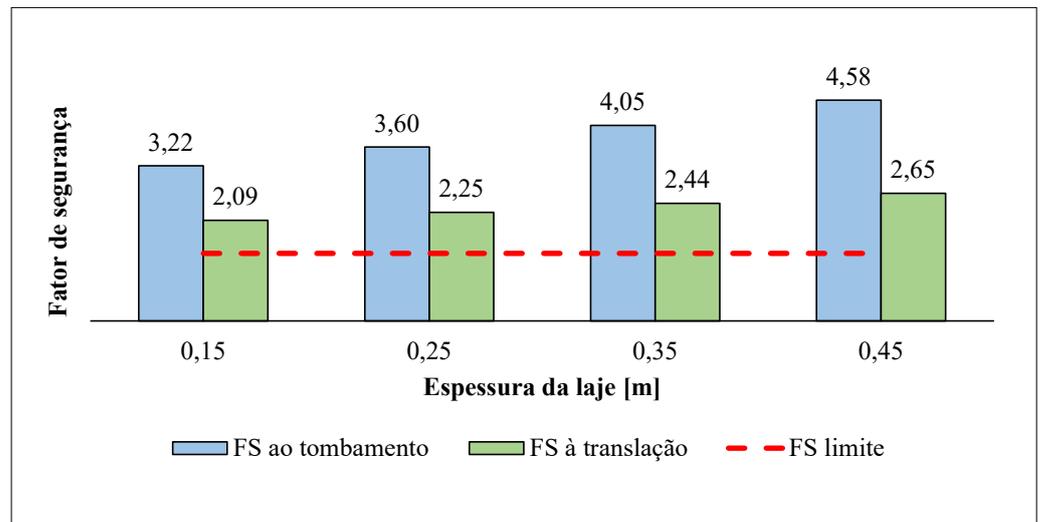


4.5 Influência da espessura da laje

A Figura 11 apresenta a influência da espessura da laje nos fatores de segurança ao tombamento e à translação. Nota-se que, para um aumento de 200% na espessura da laje, o fator de segurança ao tombamento aumentou em 42% e o fator de segurança à translação em 26%, aproximadamente. Logo, a espessura da laje auxilia de forma mais significativa na verificação do tombamento.

Figura 11 ►

Influência da espessura da laje nos fatores de segurança ao tombamento e à translação.
 Fonte: dados da pesquisa



A Figura 12 evidencia a influência da espessura da laje na área de aço das seções S_1 e S_2 . Para a espessura da laje de 0,15 m, a qual não atende à recomendação de pré-dimensionamento de $h/12$, há a necessidade de maior área de aço na seção A_{S2} . À medida que a espessura da laje atende ao pré-dimensionamento, a área de aço da seção A_{S2} decresce de forma exponencial. Desconsiderando a espessura da laje abaixo do pré-dimensionado, um aumento de 80% na espessura da laje provoca um aumento de 40% em A_{S2} . A seção S_1 , por sua vez, não tem sua área de aço afetada significativamente pela espessura da laje.

Figura 12 ▶

Influência da espessura da laje nas áreas de aço de armadura longitudinal.

Fonte: dados da pesquisa

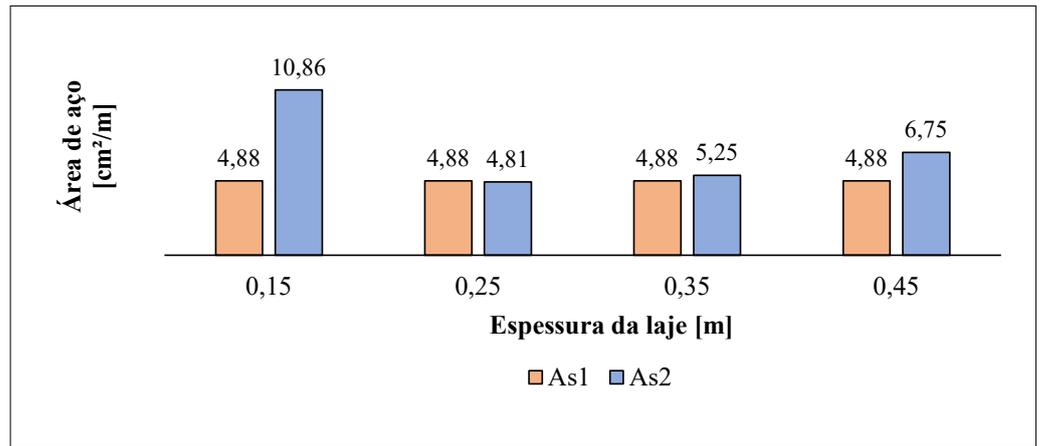


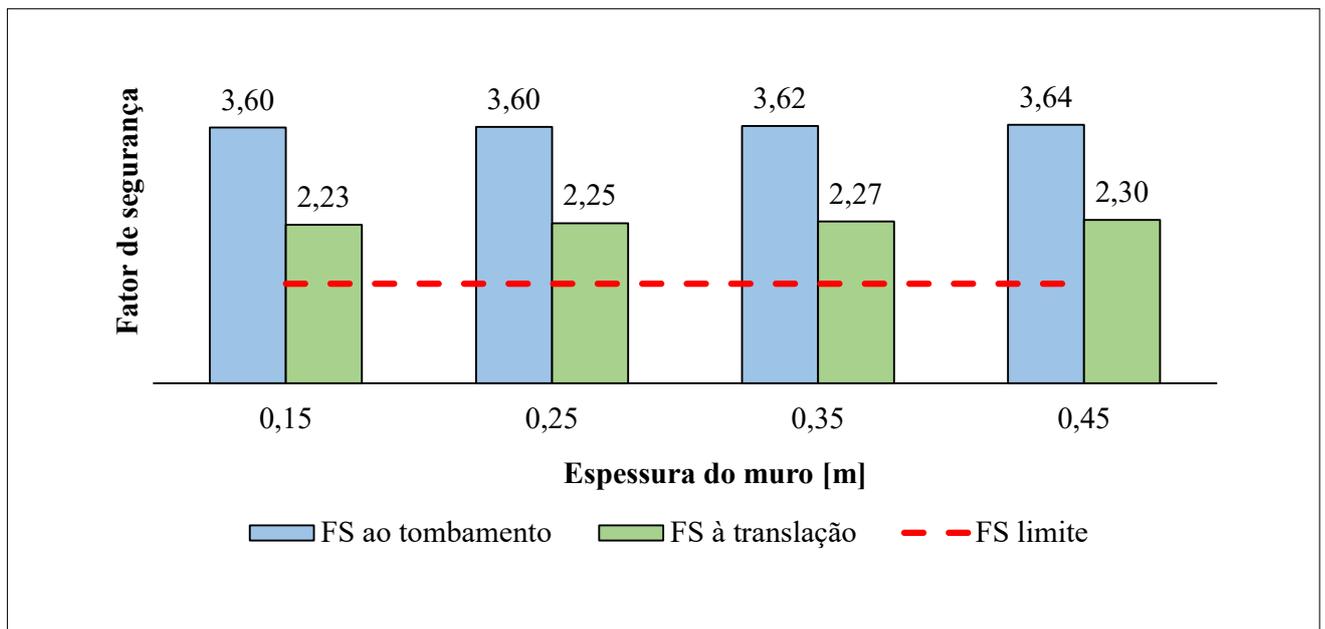
Figura 13 ▼

Influência da espessura do muro nos fatores de segurança ao tombamento e à translação.

Fonte: dados da pesquisa

4.6 Influência da espessura do muro

A Figura 13 apresenta como os fatores de segurança ao tombamento e à translação são afetados pela espessura do muro. De imediato, observa-se que tal parâmetro não exerceu influência significativa nos fatores de segurança. Especificamente, aumentos de 200% na espessura do muro acarretaram aumentos inferiores a 1% nos fatores de segurança.



A Figura 14 ilustra a influência da espessura do muro nas áreas de aço A_{S1} e A_{S2} . Para a espessura do muro de 0,15 m, a qual está abaixo do limite de pré-dimensionamento de $h/12$, a seção A_{S1} demandou 104% mais área de aço, em comparação com a espessura de 0,25 m, que está dentro do limite de pré-dimensionamento.

Avaliando somente os casos que atenderam as recomendações de pré-dimensionamento (espessuras superiores a 0,25 m), o aumento de 80% na espessura do muro causou uma redução de 38% em A_{S1} . Ademais, analogamente ao observado na seção 4.5, a área de aço A_{S2} sofre influência praticamente desprezível frente à variação da espessura do muro.

Figura 14 ►

Influência da espessura da laje nas áreas de aço de armadura longitudinal.

Fonte: dados da pesquisa

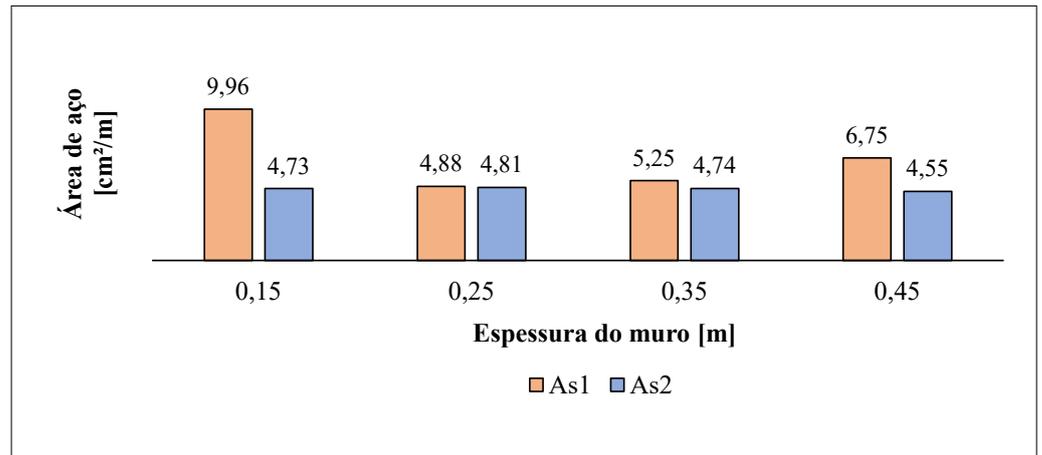


Tabela 3 ▼

Correlação entre as variáveis paramétricas e as variáveis analisadas.

Fonte: dados da pesquisa

4.7 Síntese dos resultados

A Tabela 3 apresenta uma síntese da influência das variáveis paramétricas nos fatores de segurança à translação e ao tombamento, bem como nas áreas de aço das seções S_1 e S_2 .

Variável paramétrica	Variáveis analisadas							
	FS ao tombamento		FS à translação		As_1		As_2	
	Efeito	Correlação	Efeito	Correlação	Efeito	Correlação	Efeito	Correlação
H	→	0,00%	→	0,00%	↑	210,60%	↑	149,92%
γ_s	↓	60,00%	↓	65,00%	↑	93,89%	↑	94,44%
Φ	↑	112,50%	↑	112,50%	↓	97,00%	↓	87,00%
f_{ck}	→	0,00%	→	0,00%	↓	51,00%	↓	51,00%
$b_{horizontal}$	↑	47,33%	↑	42,33%	→	0,00%	↓	53,67%
$b_{vertical}$	↑	33,70%	↑	34,33%	↓	49,33%	↓	34,67%

↑ denota correlação positiva, isto é, o aumento da variável paramétrica provoca um aumento do valor da variável analisada;

↓ denota correlação negativa, ou seja, o aumento da variável paramétrica provoca uma redução no valor da variável analisada;

→ denota que não houve influência.

A correlação foi calculada pelo quociente entre a amplitude de cada variável paramétrica e a amplitude dos resultados analisados (fatores de segurança e áreas de aço).

5 Considerações finais

Neste trabalho, foi estudada a influência de parâmetros do solo, do concreto e da geometria em um exercício de dimensionamento de muros de arrimo, tipo “L”, em concreto armado.

De imediato, verifica-se que a utilização das recomendações de pré-dimensionamento de Domingues (1997) se mostrou eficiente, acarretando geometrias que atenderam às verificações de segurança à translação e ao tombamento e que permitiram o dimensionamento da armadura de flexão com base na NBR 6118 (ABNT, 2014).

Nas análises paramétricas, observou-se que a altura do muro não influenciou os fatores de segurança ao tombamento e à translação. Em relação à área de aço, verificou-se que a altura do muro influenciou de forma exponencial a área de aço da seção S_1 e de forma linear a área na seção S_2 , justificando a altura máxima economicamente viável ser de 5 metros.

O aumento do peso específico do solo reduziu os fatores de segurança ao tombamento e à translação. Além disso, tal parâmetro fez com que as áreas de aço nas seções S_1 e S_2 aumentassem significativamente.

Já o ângulo de atrito do solo exerceu influência praticamente exponencial nos fatores de segurança ao tombamento e à translação. Especificamente, o aumento do ângulo de atrito do solo em 100% fez com que o fator de segurança ao tombamento aumentasse 126% e o fator de segurança à translação em 125%. Por sua vez, devido ao aumento do ângulo de atrito em 100%, a área de aço diminuiu em 52% na seção S_1 e 57% em S_2 .

A variação da resistência característica à compressão do concreto não influenciou os fatores de segurança ao tombamento e à translação. Na área de aço, também se verificou influência praticamente desprezível.

Por outro lado, a espessura da laje influenciou os fatores de segurança ao tombamento e à translação, aumentando-os. Na condição de espessura da laje de 0,15 m, não havia um atendimento às recomendações de pré-dimensionamento. Isso resultou em um aumento exacerbado na área de aço da seção S_2 , o que certamente inviabilizaria a execução do muro. Ademais, a variação da espessura da laje dentro dos limites de pré-dimensionamento mostrou que tal variável causa uma redução significativa em A_{S2} .

Por fim, a espessura do muro demonstrou baixíssima influência nos fatores de segurança ao tombamento e à translação. Porém, a área de aço demonstrou um comportamento inversamente exponencial com a espessura do muro.

Em suma, os parâmetros que provocaram maior influência no comportamento do muro de arrimo foram o peso específico e o ângulo de atrito do solo. Assim, a realização de ensaios para conhecer as propriedades do solo torna-se imprescindível para fundamentar a otimização do projeto, em termos tanto técnicos quanto econômicos.

Especificamente quanto ao ângulo de atrito do solo, verifica-se maior influência com as verificações de segurança e com o dimensionamento da área de aço. À medida que esse parâmetro aumenta, a área de aço é minimizada e a segurança, maximizada.

Além disso, com a evolução técnico-científica, é cada vez mais frequente a utilização de algoritmos de otimização e de redes neurais artificiais para a análise de sensibilidade das variáveis envolvidas, com o intuito de maximizar resistência, segurança e minimizar custos. Nesse contexto, o presente trabalho pode ser considerado a primeira etapa para uma sequência de análises mais aprofundadas.

Financiamento

Esta pesquisa não recebeu financiamento externo.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Referências

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ANAMT – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE MEDICINA DO TRABALHO. **Construção civil está entre os setores com maior risco de acidentes de trabalho**. ANAMT, São Paulo, 30 abr. 2019. Disponível em: <https://www.anamt.org.br/portal/2019/04/30/construcao-civil-esta-entre-os-setores-com-maior-risco-de-acidentes-de-trabalho>. Acesso em: 15 fev. 2022.

BEZERRA JÚNIOR, J. **Estudo comparativo entre muros de arrimo de gabião e concreto armado**: dimensionamento e custo benefício para solos arenosos. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Centro Universitário de João Pessoa, João Pessoa, 2019. Disponível em: <https://bdtcc.unipe.edu.br/wp-content/uploads/2020/01/TCC-Muro-de-Arrimo-2.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2022.

BROOKS, H.; NIELSEN, J. **Basics of retaining wall design**. 10. ed. Newport Beach: HBA Publication, 2010. v. 11.

COLEMAN, T. E. **Retaining walls in theory and practice**: a textbook for students. Ithaca: Cornell University Library, 2009.

COSTA, M. **Comparação de métodos empíricos e numéricos para o dimensionamento de muros de solos reforçados com geossintéticos**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021. Disponível em: <https://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/3399>. Acesso em: 15 fev. 2022.

DAS, B. M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. 6. ed. São Paulo: Thomson Learning, 2007.

DOMINGUES, P. C. **Indicações para projeto de muros de arrimo em concreto armado**. 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-20032018-104408/pt-br.php>. Acesso em: 15 fev. 2022.

FERDOUS, W.; ALMUTAIRI, A. D.; HUANG, Y.; BAI, Y. Short-term flexural behaviour of concrete filled pultruded GFRP cellular and tubular sections with pin-eye connections for modular retaining wall construction. **Composite Structures**, v. 206, p. 1-10, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.08.025>.

FERREIRA, A. S.; ASSUMPCÃO, G. A.; PAULA, M. M.; CARVALHO, M. B.; CARVALHO, C. V. A. AUTOARRIMOS: um aplicativo para dispositivos móveis para dimensionamento de muro de arrimo por gravidade. **Revista Eletrônica TECCEN**, v. 13, n. 2, p. 18-31, 2020. DOI: <https://doi.org/10.21727/teccen.v13i2.2263>.

GERSCOVICH, D.; SARAMAGO, R.; DANZIGER, B. R. **Contenções**: teoria e aplicações em obras. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2019.

KALEMCI, E. N.; IKIZLER, S. B. Rao-3 algorithm for the weight optimization of reinforced concrete cantilever retaining wall. **Geomechanics and Engineering**, v. 20, n. 6, p. 527-536, 2020. DOI: <https://doi.org/10.12989/GAE.2020.20.6.527>.

KALEMCI, E. N.; IKIZLER, S. B.; DEDE, T.; ANGIN, Z. Design of reinforced concrete cantilever retaining wall using Grey wolf optimization algorithm. **Structures**, v. 23, p. 245-253, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.09.013>.

KAVEH, A.; AKBARI, H.; HOSSEINI, S. M. Plasma generation optimization for optimal design of reinforced concrete cantilever retaining wall structures. **Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering**, v. 46, p. 1177-1200, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40996-020-00566-8>.

KIM, S.; LEE, D.-E.; KIM, Y.; KIM, S. Development and application of precast concrete double wall system to improve productivity of retaining wall construction. **Sustainability**, v. 12, n. 8, 3454, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12083454>.

MARCHETTI, O. **Muros de arrimo**. São Paulo: Blucher, 2008.

MOLITERNO, A. **Caderno de muros de arrimo**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 1994.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PINTO, L. C. M.; COSTA, R. C. P. **Dimensionamento de muro de arrimo em concreto armado com sapata corrida**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Faculdade Evangélica de Goianésia, Goianésia, 2020. Disponível em: <http://repositorio.aee.edu.br/jspui/handle/aee/9406>. Acesso em: 15 fev. 2022.

RANKINE, W. J. M. On the stability of loose earth. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, n. 147, p. 9-27, 1857. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstl.1857.0003>.

ROCHA, A. R. A. **Estudo comparativo de muros de arrimo executados em concreto armado, quando dimensionados para alturas diferentes**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Centro Universitário do Sul de Minas, Varginha, 2016. Disponível em: <http://repositorio.unis.edu.br/handle/prefix/174>. Acesso em: 15 fev. 2022.

SKINNER, T. **Retaining walls: a building guide and design gallery**. Atglen: Schiffer Publishing, 2003.

TORRES, L. Y.; CURADO, T. S.; SILVA, E. D. Análise numérica comparativa entre soluções de contenção em solo reforçado e muro à flexão. *In*: SIMPÓSIO DE PRÁTICA DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA NA REGIÃO CENTRO OESTE (GEOCENTRO), 5., 2019, Brasília. **Anais [...]**. Brasília, DF: ABMS, 2019. Disponível em: <https://qe.iweventos.com.br/upload/trabalhos/t1arquivo/lwxvLnip85jTTLZmkha0hdUXjNb4.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2022.

US NAVY – UNITED STATES NAVY. **Foundations and earth structures: Design manual 7.2**. Alexandria: Department of the Navy / Naval Facilities Engineering Command, 1982. Disponível em: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA123637.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2022.