

Investigação patológica e análise de estabilidade de um muro de arrimo em concreto armado

Pathological investigation and stability analysis of a reinforced concrete retaining wall

Kátia Daniela Ribeiro(1); Carlos Henrique José Augusto(2)

1 Centro Universitário de Formiga (UNIFOR-MG), Formiga, MG, Brasil.

E-mail: katiaribeiro@unifor.br | ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4111-447X>

2 Centro Universitário de Formiga (UNIFOR-MG), Formiga, MG, Brasil.

E-mail: carloshja@hotmail.com | ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8400-9277>

Revista de Engenharia Civil IMED, Passo Fundo, v. 9, n. 1, p. 56-74, janeiro-junho, 2022 - ISSN 2358-6508

[Recebido: 25 nov. 2020; Aceito: 28 abr. 2022]

DOI: <https://doi.org/10.18256/2358-6508.2022.v9i1.4391>

Sistema de Avaliação: *Double Blind Review*

Como citar este artigo / How to cite item: [clique aqui/click here!](#)

Resumo

As obras de contenção são estruturas utilizadas com a finalidade de estabilizar encostas e/ou aterros de solos. Essas estruturas podem ser compostas de diversos materiais e geometrias, dependendo da condição e ambiente que forem empregadas. Em Arcos (MG), após um intenso período chuvoso ocorrido entre 2019 e 2020, um muro de arrimo localizado no complexo de uma indústria cimenteira apresentou diversas patologias no trecho 3 de sua estrutura, que colocaram em dúvida a sua estabilidade. Neste sentido, o presente trabalho objetivou avaliar as manifestações patológicas ocorridas e investigar, por meio de pesquisa em campo e bibliográfica, quais os principais fatores que influenciaram o evento ocorrido, bem como propor uma terapia para intervenção da estrutura. A verificação da estabilidade do muro revelou que a capacidade de carga da fundação, juntamente às deficiências observadas no sistema de drenagem, foram as causas mais prováveis para a ocorrência das patologias verificadas no muro. A implementação dos reforços estruturais e a construção de um novo sistema de drenagem para o muro são propostas que garantirão a integridade, segurança e estabilidade da estrutura.

Palavras-chave: Coeficiente de segurança; Empuxo de terra; Obras de contenção; Sistema de drenagem.

Abstract

Containment works are structures used for the purpose of stabilizing slopes and / or landfills. These structures can be composed of different materials and geometries, depending on the condition and environment that are used. In the city of Arcos, Minas Gerais, Brazil, after an intense rainy season between 2019 and 2020, a retaining wall located in a cement industry complex presented several pathologies in section 3 of its structure, which put its stability in doubt. In this sense, the present study aimed to evaluate the pathological manifestations that occurred and to investigate, through field and bibliographic research, which are the main factors that influenced the event, as well as to propose a therapy for the intervention of the structure. The verification of the stability of the wall revealed that the load capacity of the foundation, together with the deficiencies observed in the drainage system, were the most probable causes for the occurrence of the pathologies verified in the wall. The implementation of structural reinforcements and the construction of a new drainage system for the wall are proposals that will guarantee the integrity, safety and stability of the structure.

Keywords: Safety factor; Earth thrust; Containment works; Drainage system.

1 Introdução

A modificação do relevo de um terreno é comum na maioria das construções executadas no mundo. A movimentação de terra, seja pelo corte ou aterro, possui a finalidade, em geral, de criar um ou mais níveis (platôs) para melhor adequação de uma obra civil.

Da implantação de um platô através dos serviços de terraplenagem, originam-se taludes, também conhecidos como encostas ou rampas, que são superfícies inclinadas que servem para dar sustentação ao solo cortado ou aterrado próximo ao platô. Para a contenção e a estabilização dos taludes utilizam-se estruturas de contenção, tais como os muros de arrimo, cuja estabilidade é fator preponderante para a segurança de construções próximas bem como de pessoas (CRUZ *et al.*, 2020), devido aos riscos associados com sua possível ruína provocada por fatores diversos, principalmente por erros de projeto ou falhas durante a execução da obra (MARCELLI, 2007).

As obras de contenção, assim como ocorre com outras estruturas da engenharia, podem perder sua eficácia ao longo de sua vida útil (NASCIMENTO, 2020). Essa perda de eficácia, relacionada muitas vezes a agentes agressivos, deficiências de projeto e falhas de execução, está associada à manifestação de patologias na estrutura da contenção que comprometem seu desempenho, durabilidade e capacidade de carga (CRUZ *et al.*, 2020).

O acompanhamento da estrutura de contenção ao longo de sua vida útil é fundamental para a verificação de manifestações patológicas que possam comprometer a estabilidade e segurança da estrutura, evitando os sinistros relacionados à ruptura dessas obras.

Dessa forma, o presente trabalho trata da investigação patológica de um muro de arrimo por flexão situado em uma indústria cimenteira localizada no município de Arcos-MG com o objetivo de identificar as patologias ocorridas, apontar as possíveis causas para as manifestações patológicas, além de propor uma solução para a recuperação e estabilização da estrutura de contenção.

2 Referencial teórico

Segundo a NBR 11682 (ABNT, 2009), as obras de contenção são elementos destinados a contrapor-se aos esforços provenientes do terreno e de sobrecargas acidentais e/ou permanentes. Essas estruturas, usualmente denominadas de muro de arrimo ou contenção, são utilizadas quando há necessidade de conter encostas e/ou aterros e podem ser divididas em dois tipos: gravidade ou flexão.

2.1 Muros de gravidade

De acordo com DER/SP (2005), muros de gravidade são estruturas que podem ser construídas em concreto ciclópico, pedra argamassada, *crib-wall*¹, solo ensacado, concreto ensacado, solo compactado, solo-cimento compactado, solo reforçado com geossintético, solo reforçado com fitas metálicas, enrocamento, gabião etc., nos quais prevalece o peso do muro como elemento estabilizante.

Costa (2010) descreve que a principal vantagem na utilização desse tipo de estrutura está relacionada à simplicidade de execução, não sendo requerido, em geral, mão de obra especializada. No entanto, para vencer desníveis muito altos, o consumo de material é muito elevado, o que restringe a sua utilização a estruturas de pequeno e médio porte.

2.2 Muros de flexão

Em contrapartida, Gerscovich (2010) define os muros de flexão como estruturas mais esbeltas com seção transversal em forma de “L” que resistem aos empuxos por flexão, utilizando parte do peso próprio do maciço que se apoia sobre a base do “L” para manter-se em equilíbrio.

Rocha (2016) recomenda que os muros de flexão de perfil em “L” devem ser utilizados para alturas de até 2 metros, quando não existirem contrafortes². Andrade (2018), por sua vez, ressalta que, em geral, os muros de flexão construídos em concreto armado tornam-se antieconômicos para alturas acima de 5 a 7 m e reforça que para muros de alturas superiores a 5 metros, é conveniente a utilização de contrafortes para aumentar a estabilidade contra o tombamento.

2.3 Obras complementares – Drenagem

Segundo Genário *et al.* (2020), grande parte dos acidentes envolvendo muros de arrimo está relacionada ao acúmulo de água no maciço. A existência de uma linha freática no maciço é altamente desfavorável, aumentando substancialmente o empuxo total. O acúmulo de água, por deficiência de drenagem, pode duplicar o empuxo atuante.

De acordo com Santana (2006), os elementos de drenagem são compostos basicamente por uma camada de solo mais permeável que o contido, podendo ser areia e/ou brita, e a colocação de barbacãs³, permitindo assim o rápido escoamento da água para o lado externo da estrutura.

- 1 *Crib-wall* são estruturas formadas por elementos pré-moldados de concreto armado, madeira ou aço, que são montados no local, em forma de “fogueiras” justapostas e interligadas longitudinalmente, cujo espaço interno é preenchido com material granular graúdo. (GERSCOVISH, 2010).
- 2 Contrafortes ou nervuras são estruturas de reforço dos muros de flexão para aumentar a estabilidade contra o tombamento (PUNMIA; JAIN; JAIN, 1998).
- 3 Barbacã = Orifício para escoamento de águas, executado em muros de suporte (DEAN, 2020).

Além disso, conforme Ananias (2006), a construção de elementos de drenagem superficial, tais como canaletas longitudinais e transversais, dissipadores de energias e caixas coletoras são de grande valia, uma vez que eles são responsáveis por captar e direcionar grande parte da água precipitada na superfície da construção.

2.4 Esforços atuantes

Os muros de arrimo estão sujeitos a forças verticais e horizontais que tendem a deslocar a estrutura do seu eixo estático. Dentre essas forças, merecem atenção o empuxo ativo e o empuxo passivo.

Marangon (2018) caracteriza como empuxo ativo a força resultante que desloca a estrutura para fora do terrapleno. Esse esforço é provocado pelo maciço contido ao procurar se adaptar ao seu estado inicial de repouso, isto é, ter novamente a sua declividade, explica Vieira Júnior (2014). Por outro lado, o empuxo passivo é caracterizado por Maragon (2006) como a força resultante que desloca a estrutura para dentro do terrapleno, logo, trata-se de uma força contrária ao empuxo ativo e que auxilia na estabilização do maciço.

2.5 Verificação da estabilidade

Segundo Dutra (2015), o engenheiro, antes de se decidir sobre a solução para atender ao problema de contenção de um talude, deve conhecer a natureza geológica da região onde será implantada a obra. Isso porque os dados geotécnicos e de resistência do solo são fatores determinantes para o dimensionamento de um muro de contenção.

No dimensionamento de um muro de arrimo, seja ele de gravidade ou de flexão, devem ser verificadas as seguintes condições de estabilidade: tombamento, deslizamento da base, capacidade de carga da fundação e ruptura global (GERSCOVISH, 2010).

Quanto ao tombamento, Kapt (2020) indique que se deve verificar se o momento resistente (momento gerado pelo peso do muro) é maior do que o momento solicitante (momento do empuxo total atuante no muro).

Com relação ao deslizamento, conforme Reis e Prado (2018), se for verificado o equilíbrio das componentes horizontais das forças atuantes (empuxos ativo e passivo), o muro não deslizará sobre sua base.

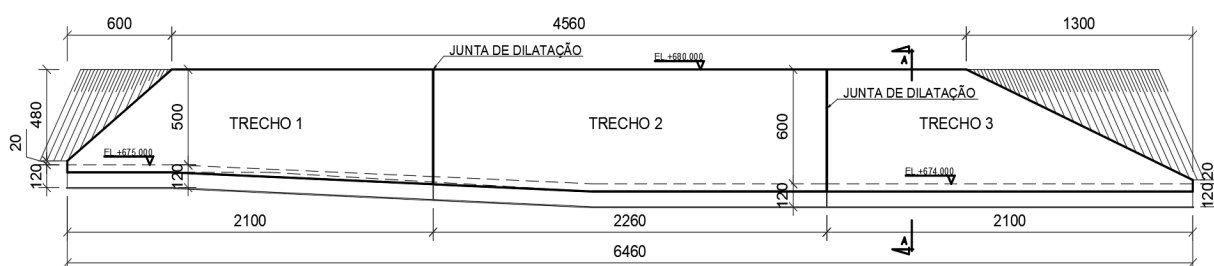
Já a capacidade de carga consiste na verificação da segurança contra a ruptura e deformações excessivas do terreno de fundação e sua análise considera o muro rígido e a distribuição de tensões linear ao longo da base. Considera-se que o terreno estará submetido apenas a tensões de compressão quando a resultante das forças atuantes no muro localizar-se no núcleo central da base do muro (GERSCOVISH, 2010).

A estabilidade quanto à ruptura total refere-se à segurança do conjunto muro-solo e consiste na verificação de um mecanismo de ruptura global do maciço. Considera-se a estrutura de contenção como um elemento interno à massa de solo, que pode se deslocar como um corpo rígido, aplicando-se qualquer método de cálculo de equilíbrio limite para a avaliação da segurança e estabilidade do talude (JABER, 2011).

3 Metodologia

O presente estudo avaliou a estabilidade de um muro de flexão de concreto armado e das manifestações patológicas ocorridas no trecho 3 da estrutura (Figura 1) durante o período chuvoso do ano de 2020.

Figura 1. Visão geral do muro de flexão estudado



Fonte: Autoria própria.

O estudo das manifestações patológicas ocorreu em duas etapas: i) Na etapa 1, desenvolvida entre dezembro de 2019 e maio de 2020, realizou-se o levantamento geométrico do muro e do local, seguido do mapeamento das patologias, aferições dos deslocamentos provocados e acompanhamento fotográfico dos danos causados. ii) Na etapa 2, desenvolvida entre março de 2020 e agosto de 2020, realizou-se um estudo para identificar as possíveis causas que provocaram o deslocamento da estrutura, destacando pontos de interesse do projeto original associados ao ponto de vista geotécnico para, por fim, realizar as recomendações de terapias para solucionar o problema.

3.1 Descrição do objeto de estudo

Trata-se de um muro de contenção situado no complexo de uma indústria cimenteira, localizado próximo à Estrada dos Fazendeiros, no município de Arcos-MG. Sua construção, datada de 2016, foi motivada pela necessidade de se obter área suficiente para a construção de um galpão para armazenagem de aditivo para a segunda planta de produção de clínquer da fábrica, denominada Linha II (Figura 2). O solo utilizado para o aterro do muro foi proveniente das escavações do platô onde foi construído o galpão, conforme mostrado na Figura 3, e a compactação do aterro foi feita em camadas de 20 centímetros de espessura.

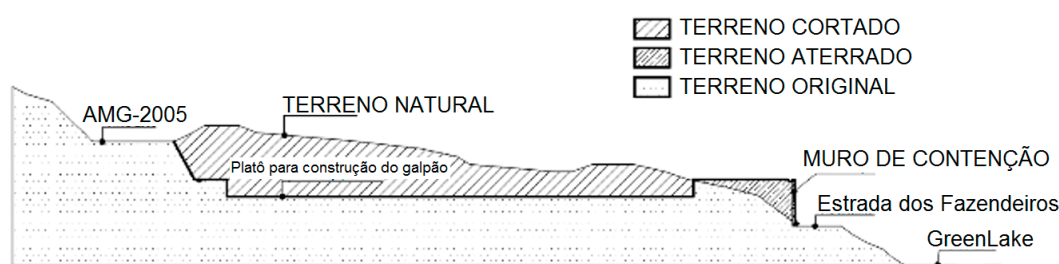
Os dados geométricos do muro foram obtidos com base em medições em campo e projetos fornecidos pela proprietária da fábrica. De modo geral, a geometria da contenção pode ser caracterizada como um muro de flexão, construído em concreto armado, que se estende por 64,6 metros de comprimento, dividido em três trechos unidos por juntas de dilatação.

Figura 2. Localização do muro de contenção estudado



Fonte: Autoria própria.

Figura 3. Esquema construtivo do muro de contenção estudado



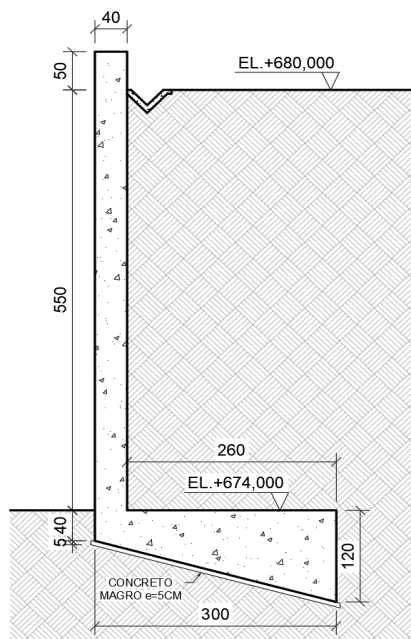
Fonte: Autoria própria.

O corpo da estrutura corresponde a uma parede perpendicular à base com 40 centímetros de espessura e 6 metros de altura máxima. A base vinculada ao corpo possui 1,2 metros de altura máxima e 3 metros de largura. A Figura 4 apresenta o perfil do muro analisado, com as informações de solo a montante e jusante.

A drenagem do muro é composta por drenos de areia internos, junto à face interna do muro, e por uma canaleta de seção triangular situada no topo do muro. As canaletas foram moldadas *in loco* e se estendem em todo o comprimento do muro, conduzindo as águas pluviais até as canaletas hidráulicas, localizadas nas extremidades.

À montante do muro, situado a 10 metros da aresta mais próxima, localiza-se o galpão de estocagem de aditivo. Sua estrutura é constituída por uma fundação em radier e superestrutura metálica. Possui área de ocupação de 4947 m² e 20 m de altura.

À jusante do muro, junto à base, está a Estrada dos Fazendeiros, com 4,5 metros de largura, sem qualquer pavimentação. A estrada é de acesso privativo da indústria cimenteira e margeia toda a extensão do Green Lake, lago artificial situado na área pertencente à indústria cimenteira.

Figura 4. Seção transversal do muro de contenção estudado

Fonte: Autoria própria.

3.2 Sondagem do terreno

As primeiras sondagens do terreno foram feitas em 2013, em topografia primitiva, para viabilização da construção do galpão. Foram executados 3 furos na área de construção, sendo o furo SP-S-01, de coordenadas UTM N = 7.753.791 m e E = 439.247 m, Datum Sirgas 2000, fuso 23K, o mais próximo do local de construção do muro de contenção estudado.

O furo SP-S-01 partiu da cota 681,28 m e penetrou 25 m de profundidade, sem qualquer presença do lençol freático. Segundo o boletim de sondagem, a camada referente à base do muro de contenção é composta por argila silto-arenosa com N_{spt} igual a 2 golpes, indicando solo com baixa resistência.

3.3 Investigação dos eventos patológicos

A investigação dos eventos patológicos foi resumida em duas visitas de campo, sendo a primeira visita realizada em 31 de janeiro de 2020 e a segunda visita foi realizada em 25 de maio de 2020. As visitas foram acompanhadas pela proprietária da fábrica, que forneceu informações sobre os eventos ocorridos. Os resultados obtidos nas visitas foram registrados em fotografias.

3.4 Parâmetros geotécnicos do solo

O memorial de cálculo do projeto do muro de flexão estudado foi disponibilizado pela proprietária da fábrica e dele foram extraídos os parâmetros geotécnicos e

de resistência do solo que foram utilizados para o dimensionamento do muro de contenção. Esses parâmetros foram obtidos a partir dos resultados do ensaio de sondagem SPT realizado em 2013, sendo tabulados para posterior análise.

Os dados da tensão admissível (σ_{adm}), densidade (γ), coesão (c), ângulo de atrito interno do solo (φ) e ângulo de atrito solo/muro (φ') também foram estimados, através de equações e tabelas da literatura, em função dos dados do mesmo laudo do ensaio de sondagem SPT realizado em 2013, de tal modo a comparar resultados estimados aos apresentados no memorial de cálculo original do projeto da estrutura de contenção.

A camada considerada para a estimativa dos parâmetros supracitados foi a de cota 672,8 m, de N_{spt} igual a 2, sendo escolhida por se tratar da camada de suporte da fundação da estrutura. A Tabela 1 descreve a consistência e peso específico de solos argilosos em função do N_{spt} encontrado.

Tabela 1. Consistência e peso específico de solos argilosos em função do N_{spt}

N_{spt}	≤ 2	3 – 5	6 – 10	11 – 19	≥ 20
Consistência	Muito Mole	Mole	Média	Rija	Dura
γ (kN/m³)	13	15	17	19	21

Fonte: Godoy, 1972 *apud* Hachich *et al.*, 1998.

A tensão admissível do solo foi calculada utilizando a Equação 1 de fundações profundas (ALONSO, 1983).

$$\sigma_{adm} = N_{spt}/30 \quad \text{Eq. 1}$$

em que: σ_{adm} = tensão efetiva do solo (MPa) e N_{spt} = índice de resistência à penetração obtido no ensaio de SPT.

A coesão do solo foi calculada utilizando a Equação 2 proposta por Teixeira e Godoy (1996 *apud* HACHICH *et al.*, 1998).

$$c = 10 * N_{spt} \quad \text{Eq. 2}$$

em que: c = coesão do solo em kPa.

O ângulo de atrito interno do solo foi calculado pela Equação 3, sugerida por Godoy (1983 *apud* FORTUNATO; FERREIRA, 2020).

$$\varphi = 28^\circ + 0,4 * N_{spt} \quad \text{Eq. 3}$$

em que: φ = ângulo de atrito interno.

O valor do ângulo de atrito entre o solo e o muro foi estimado utilizando a Tabela 2, de Potyondy (1961 *apud* FERREIRA *et al.*, 2013), em função do tipo de solo e superfície de contato.

Tabela 2. Ângulo de atrito entre o solo e o muro

Solo	Rugosidade da superfície de contato	Valores de ângulo de atrito solo-muro (φ')
Areia	Concreto liso	$\varphi'/\varphi=0,84$ seco
		$\varphi'/\varphi=0,84$ saturado
	Concreto rugoso	$\varphi'/\varphi=0,98$ seco
		$\varphi'/\varphi=0,90$ saturado
Silte	Concreto liso	$\varphi'/\varphi=0,99$ seco
		$\varphi'/\varphi=0,95$ saturado
Argila (mistura)	Concreto liso	$\varphi'/\varphi=0,52$
	Concreto rugoso	$\varphi'/\varphi=0,57$

Fonte: FERREIRA *et al.*, 2013.

3.5 Análise de estabilidade

Na verificação da estabilidade, procura-se compreender todos os esforços atuantes e a capacidade de suporte da obra de contenção. Além disso, os fatores de segurança mínimos para verificação da estabilidade devem atender aos valores estabelecidos pela NBR 11682 (ABNT, 2009), expressos na Tabela 3.

Tabela 3. Valores mínimos para os fatores de segurança

Verificação da segurança	Estabilidade	Tombamento	Deslizamento	Capacidade de carga da fundação
Fator de segurança mínimo	1,5	2,0	1,5	3,0

Fonte: ABNT, 2009.

Para a análise da estabilidade do muro estudado, adotaram-se, para fins de cálculos, três metodologias distintas. Os primeiros resultados obtidos foram provenientes do memorial de cálculo original do projeto do muro de contenção. Dele foram extraídos os resultados dos esforços atuantes no muro de contenção utilizando-se os parâmetros geotécnicos também extraídos do memorial de cálculo, bem como as verificações nele calculadas.

A segunda metodologia para análise da estabilidade do muro considerou os mesmos parâmetros de entrada do memorial de cálculo original. Todavia, os cálculos dos empuxos e coeficientes de segurança foram realizados com base nas recomendações na NBR11682 (ABNT, 2009) que traz todas as verificações de estabilidade necessárias para a segurança da integridade da contenção.

A terceira metodologia de análise da estabilidade do muro foi realizada utilizando-se os parâmetros geotécnicos estimados pelas Equações 1, 2 e 3 e pelas Tabelas 1 e 2, a partir do ensaio de SPT realizado em 2013, com os cálculos dos

empuxos, momentos estáticos e coeficientes de segurança também realizados com base nas recomendações na NBR11682 (ABNT, 2009).

3.6 Análise dos dados

Os dados coletados foram analisados e interpretados com base na fundamentação teórica de modo a compreender e justificar os resultados obtidos. Logo, os dados obtidos foram confrontados entre si e com a literatura pertinente de modo a subsidiar a proposição das causas das patologias bem como da terapia corretiva para as mesmas.

4 Resultados e Discussão

4.1 Análise das patologias

Durante a inspeção realizada na primeira visita de campo, em janeiro de 2020, foi possível constatar que o trecho 3 da estrutura sofreu uma rotação da base, resultando num deslocamento horizontal no topo de aproximadamente 10 cm e um recalque de 3,5 cm. Além disso, foram identificadas a presença de fissuras no solo contido pelo muro, distanciadas a 3 metros da parede. A junta de dilatação entre os trechos 3 e 2 estava contraída por conta do deslocamento provocado e, a 1,5 m do topo da parede, houve um desprendimento do concreto devido ao encontro dos dois trechos. As patologias constatadas na primeira visita são ilustradas na Figura 5.

A integridade do sistema de drenagem também estava comprometida, uma vez que foram encontradas canaletas quebradas e assoreadas por material sedimentar. Nas saídas dos drenos internos, foram encontradas manchas de barro que atestam a percolação de solo e o comprometimento do sistema de drenagem interno (Figura 6).

Figura 5. Patologias constatadas na primeira visita de campo



Fonte: Autoria própria.

Figura 6. a) Canaletas quebradas e assoreadas; b) Manchas nos drenos



a)

b)

Fonte: Autoria própria.

Na segunda visita, realizada em maio de 2020, observou-se que o muro não apresentou evoluções de deslocamento, porém a canaleta ainda estava assoreada. Os pontos de fissuras no solo apresentaram aberturas maiores, chegando a aproximadamente 20 centímetros de profundidade e as canaletas encontravam-se rebaixadas, indicando adensamento do solo. As patologias constatadas na segunda visita são ilustradas na Figura 7.

Figura 7. Patologias constatadas na segunda visita de campo: a) canaleta assoreada; b) fissura no solo aumentada



a)

b)

Fonte: Autoria própria.

As primeiras manifestações de deslocamento foram observadas em janeiro de 2020, conforme relatado pela proprietária da fábrica na primeira visita de campo, após as intensas chuvas ocorridas entre dezembro de 2019 e janeiro de 2020.

No município de Arcos-MG, a estação com precipitação geralmente ocorre no primeiro e último trimestres anuais e a ocorrência das chuvas, aliada ao acúmulo de água devido a um sistema de drenagem deficiente, favorecem o aumento de poropressão no solo contido pelo muro, aumentando o empuxo ativo (CAMILO;

AMORIM; TERRA, 2019). Tudo isso contribui para o surgimento de patologias como as observadas nas visitas realizadas. Cabe ressaltar ainda que, durante as visitas, verificou-se que a cobertura do galpão construído não possui sistema de drenagem e a água precipitada no telhado é lançada diretamente no solo do local.

4.2 Verificação da estabilidade

Os dados geotécnicos extraídos do memorial de cálculo do projeto original do muro e os estimados pelas Equações 1, 2 e 3 e Tabelas 1 e 2 são apresentados a seguir, na Tabela 4, juntamente com os resultados obtidos para os coeficientes de segurança calculados pelas três metodologias propostas.

Tabela 4. Parâmetros geológicos e coeficientes de segurança

Metodologia	Método 1	Método 2	Método 3
Dados de entrada	Memorial de cálculo	Memorial de cálculo	Dados estimados
Peso específico do solo (γ_s)	20,6 kN/m ³	20,6 kN/m ³	13 kN/m ³
Peso específico do muro (γ_m)	25 kN/m ³	25 kN/m ³	25 kN/m ³
Ângulo de atrito interno do solo (φ)	25°	25°	28,8°
Ângulo de atrito entre solo/muro (φ')	20°	20°	16,42°
Coesão do solo (c)	0 kN/m ²	0 kN/m ²	20 kN/m ²
Altura do muro (H)	6,4 m	6,4 m	6,4 m
Altura do solo sobre a base (h)	5,5 m	5,5 m	5,5 m
Sobrecarga (S)	56,35 kN	56,35 kN	56,35 kN
Tensão admissível do solo (σ_{adm})	250 kN/m ²	250 kN/m ²	100 kN/m ²
Resultados obtidos	Memorial de cálculo	NBR 11682:2009	NBR 11682:2009
Empuxo ativo (E_a)	188,26 kN	126,50 kN	68,82 kN
Ponto de aplicação a partir do topo do muro	3,96 m	4,17 m	4,17 m
Momento rev. devido ao empuxo de terra	459,42 kN.m	231,92 kN.m	126,17 kN.m
Empuxo passivo (E_p)	Não informado	14,62 kN	26,76 kN
Peso próprio do muro	121,52 kN	120 kN	120 kN
Abcissa Xg a partir do ponto de rotação	1,06 m	0,975 m	0,975 m
Momento est. devido ao peso próprio do muro	128,81 kN.m	117 kN.m	117 kN.m
Peso do solo sobre a sapata	345,74 kN	300,3 kN	185,90 kN
Abcissa Xg a partir do ponto de rotação	1,8 m	1,70 m	1,70 m

Metodologia	Método 1	Método 2	Método 3
Momento est. devido ao peso do solo sobre a sapata	622,30 kN.m	510,51 kN.m	316,03 kN.m
Peso da sobrecarga sobre a sapata	56,35 kN	52 kN	52 kN
Abcissa Xg a partir do ponto de rotação	2,05 m	1,7 m	1,7 m
Momento est. devido à sobrecarga sobre a sapata	115,51 kN.m	88,4 kN.m	88,4 kN.m
Somatório dos momentos estabilizadores	866,62 kN.m	715,91 kN.m	521,43 kN.m
Coefficiente de segurança ao tombamento	1,89	3,15	4,22
Coefficiente de segurança ao deslizamento	3,62	1,65	2,79
Coefficiente de segurança à capacidade de carga da fundação	Não informado	0,27	0,16

Fonte: Dados da pesquisa, 2020.

Os dados de entrada referentes ao método 1 são provenientes do memorial de cálculo original do muro de contenção. Para fins de revisão do cálculo do memorial original, o método 2 utilizou os mesmos dados de entrada do método 1. As diferenças obtidas nos dados de entrada do projeto e os dados estimados demonstra a importância do conhecimento do solo do local para a elaboração de um projeto. Os dados de peso específico do solo e tensão admissível merecem especial atenção pois trata-se dos dados que mais influenciam os resultados finais da verificação de estabilidade.

A verificação dos coeficientes de segurança quanto ao deslizamento apresentaram-se acima do valor mínimo recomendado (1,5) para todos os métodos adotados, porém, a verificação quanto à capacidade de carga da fundação ficou abaixo do valor mínimo recomendado (3,0) para os métodos 2 e 3, não sendo informada ou calculada no projeto original do muro de contenção estudado (método 1). A verificação quanto à capacidade de carga da fundação relaciona-se à tensão admissível do solo, que foi considerada igual a 250 kN/m² no projeto original. Conforme demonstrado na análise de sondagem do terreno, a base do muro está sobre um solo de N_{spt} igual a 2, indicando a importância da verificação desse coeficiente por se tratar de um solo de baixa resistência mecânica, ou seja, os valores muito baixos verificados para o coeficiente de segurança para a capacidade de carga da fundação indicam ineficiência do solo para sustentar a carga proveniente do muro e solo contido.

Marangon (2012) relata que um coeficiente de segurança à capacidade de carga da fundação satisfatório é importante para se evitar a ruptura ou o escoamento do solo ou do elemento estrutural de fundação devido a uma perda de capacidade de carga). O autor esclarece que as pressões admissíveis dependem da sensibilidade da construção

projetada aos recalques, especialmente aos recalques diferenciais específicos, que são os que prejudicam a estabilidade da estrutura.

Além disso, é possível notar que o ponto de aplicação da carga não corresponde a um terço da altura da parede, onde se concentra a resultante dos esforços de empuxo ativo. Assim sendo, o momento solicitante tende a ser maior quando aplicado a alturas superiores a um terço da altura da parede, superdimensionando o valor de empuxo ativo.

Luiz (2014) cita que as forças induzidas pelo processo de compactação do reaterro no tardo do muro elevam o módulo e o ponto de aplicação do empuxo de terra. Apesar do presente estudo não ter como objetivo a análise do processo construtivo do reaterro do muro, essa informação torna-se relevante ao chamar atenção para o fato de que, mesmo com um dimensionamento correto e criterioso, durante a execução da estrutura podem ocorrer modificações das condições de projeto inicial e levar a possíveis patologias.

Com relação ao coeficiente de segurança contra o tombamento, os resultados obtidos pelos métodos 2 e 3 adequaram-se à NBR 11682:2009; já o valor extraído do memorial de cálculo do projeto original encontra-se abaixo do valor mínimo recomendado (2,0). O não cumprimento deste coeficiente de segurança revela que o muro de contenção não dispõe de estabilidade suficiente para conter o efeito de rotação da base, chamado de tombamento. Esse efeito é causado quando o peso do solo não é suficiente para estabilizar o momento resultante do muro de contenção.

Oliveira, Branco e Tavares (2018), analisando o deslizamento de um muro de arrimo no norte de Minas Gerais, também verificaram que, do ponto de vista geotécnico, os coeficientes de segurança não atenderam aos fatores de segurança mínimos para deslizamento e capacidade de carga da fundação, concluindo que houve um grande equívoco no dimensionamento dos muros, que pode ter sido ocasionado por diversos fatores tais como: cotas de boca das sondagens com referência não padronizada; não havia sondagem próxima à fundação do muro; não teve acompanhamento tecnológico da execução do aterro; e a ausência de um projeto de drenagem superficial. Os autores ainda relataram que, em seu estudo, já haviam sido observadas movimentações nas estruturas em uma vistoria antes do término da obra e, mesmo com estas evidências, nenhuma medida para conter a movimentação foi tomada, já que o engenheiro responsável pelo cálculo alegou que se devia ao fato de acomodação do terreno, resultado este que mostra a importância da verificação dos coeficientes de segurança no decorrer do dimensionamento.

4.3 Proposta de terapia

De um modo geral, além da deficiência verificada no sistema de drenagem do muro de contenção estudado, verificou-se que a ocorrência do recalque, com consequente deslocamento e desprendimento do topo do muro bem como na junta de

dilatação, está diretamente ligada à capacidade de carga da fundação. Logo, propõe-se como solução para a estabilização do muro de contenção e remediação das patologias verificadas está voltada à execução de um projeto para seu reforço estrutural. Portanto, indica-se a execução de uma cortina de estacas junto à base do muro, ao longo de todo o comprimento do trecho 3, pois entende-se que o aumento da área de contato da estrutura com o solo, em se tratando de estacas, provoca uma melhor distribuição das cargas provenientes do muro.

Adicionalmente, propõe-se que, ao efetuar o reaterro do solo à montante, os drenos internos sejam novamente refeitos, adotando material granular, como areais ou britas, assim como seja executado uma nova canaleta no topo e na base do muro de modo a conseguir escoar com eficiência toda a demanda de água precipitada no local.

5 Considerações finais

A verificação da estabilidade do muro, pelas três metodologias analisadas, revelou uma falha no projeto original da estrutura ao indicar que a capacidade de carga da fundação é a causa mais provável para a ocorrência do recalque no trecho 3 do muro. Além disso, as chuvas ocorridas no ano de 2020, no período de execução desse estudo, favoreceram a ocorrência do deslocamento do muro.

O assoreamento e obstrução das canaletas e drenos tornaram o sistema de drenagem ineficiente e, juntamente à inexistência de sistema de drenagem na base do muro, favoreceu o acúmulo e infiltração da água no pé do muro, tornando o solo frágil e susceptível a recalques.

A implementação dos reforços estruturais e a construção de um novo sistema de drenagem para o muro são propostas que garantirão a integridade, segurança e estabilidade da estrutura.

Referências

- ALONSO, Urbano Rodriguez. *Exercícios de fundações*. São Paulo: Edgard Blucher Ltda. 1983.
- ANANIAS, E. J. *Pontes rodoviárias: levantamento das principais patologias geotécnicas em encontros e fundações*. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade de São Francisco (USF), Itatiba, SP, Brasil, 2006. Disponível em: <https://sil0.tips/download/universidade-sao-francisco-usf-centro-de-ciencias-exatas-e-tecnologicas-engenhar-5>. Acesso em: 31 out. 2020.
- ANDRADE, M. O. *Análise comparativa de custos entre estruturas de contenção*. São Cristóvão: UFS, 2018. 108 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil). Disponível em: https://ri.ufs.br/bitstream/riufs/10130/2/Mariana_Oliveira_Andrade.pdf. Acesso em: 29 out. 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *NBR 11682: estabilidade de encostas*. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. Disponível em: <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:FdYZRFKNVlgJ:https://fdocumentos.tips/document/nbr-11682-2009-estabilidade-de-encostas.html+&cd=5&hl=pt-BR&ct=clnk&gl=br>. Acesso em: 29 out. 2020.
- CAMILO, A. K. S.; AMORIM, B. F. C.; TERRA, V. S. *Desempenho de muros de contenção de gabião e concreto ciclópico com avaliação de seus respectivos sistemas de drenagem*. Universidade de Rio Verde, Faculdade de Engenharia Civil, 2019. Disponível em: <http://www.unirv.edu.br/conteudos/fckfiles/files/Desempenho%20de%20Muros%20de%20Conten%C3%A7%C3%A3o%20de%20Gabi%C3%A3o%20e%20Concreto%20Cicl%C3%B3pico%20Com%20Avalia%C3%A7%C3%A3o%20de%20Seus%20Respectivos%20Sistemas%20de%20Drenagem.pdf>. Acesso em: 31 out. 2020.
- COSTA, B. G. Efeito de translação do centro de rotação na análise de muros de suporte gravíticos fundados em terrenos compressíveis. 2010. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil) - Universidade do Porto, Porto, Portugal. 2010. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/58933/1/000147485.pdf>. Acesso em: 29 out. 2020.
- CRUZ, R.B.C.; SANTOS, F.A.; SOUZA, J.B.; KHALIL, J.A.; CARVALHO, R.M.G.; FILHO, A.M. Método para análise do risco em estruturas de arrimo em concreto armado. *Revista de Engenharia Civil*, n. 57, p. 36-49, 2020. Disponível em: <http://www.civil.uminho.pt/revista/artigos/n57/Pag.36-49.pdf>. Acesso em: 21 set. 2020.
- DEAN, M. *Retaining Wall Drainage Guide*. Pool Research, 2020. Available at: <https://poolresearch.com/retaining-wall-drainage/>. Access on 31 oct. 2020.
- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO – DER/SP. *Instrução de Projeto: projeto de muro de arrimo*. São Paulo: DER/SP, 2005. Disponível em: ftp://ftp.sp.gov.br/ftpder/normas/IP-DE-C00-005_A.pdf. Acesso em: 29 out. 2020.
- DUTRA, M. A. *Estruturas de contenção: análise comparativa entre muro de arrimo de concreto armado e cortina de estacas de concreto armado em obra de contenção*. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Faculdade Santa Rita (FASAR), Conselheiro Lafaiete, MG, 2015. Disponível em: https://www.fasar.com.br/arquivos/projetos/engciv/EngCiv-2015-Analise_Comparativa_entre_Muro_de_Arrimo-TCC.pdf. Acesso em: 31 out. 2020.

FERREIRA, S. R. M.; OLIVEIRA, J. T. R.; FUCALE, S. P.; SÁ, W. B.; MOURA, S. F. A. Avaliação do ângulo de atrito solo-muro e da rugosidade da superfície de contato. *Ciência & Engenharia*. v. 22, n. 2, p. 11-19, jul.-dez. 2013. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/cieng/article/download/23750/20054/>. Acesso em: 31 out. 2020.

FORTUNATO, G.; FERREIRA, R. G. *Utilização de métodos teóricos e semi-empíricos no dimensionamento das fundações*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade do Sul de Santa Catarina (UNISUL), Palhoça, SC, 2020. Disponível em: https://www.riuni.unisul.br/bitstream/handle/12345/10043/TCC_RAFAEL_GEOVANE%20FINAL_revisado.pdf?sequence=2&isAllowed=y. Acesso em: 31 out. 2020.

GENÁRIO, D. C. F.; LOPES, P. H. C.; MILLER, C. P.; LIMA, A. C.; SOUZA, V. B. Estrutura de contenção: muro de arrimo por flexão para estabilização de encostas em Muriaé-MG. *Revista Interdisciplinar Pensamento Científico*, v. 5, n. 5, 2020. Disponível em: <http://www.reinpec.org/reinpec/index.php/reinpec/article/view/448/369>. Acesso em: 31 out. 2020. DOI: <https://doi.org/10.20951/2446-6778/v5n5a85>

GERSCOVISH, D. M. S. *Estruturas de contenção: muros de arrimo*. Universidade do Estado do Rio de Janeiro: Departamento de Estruturas e Fundações, 2010. Disponível em: <http://www.eng.uerj.br/~denise/pdf/muros.pdf>. Acesso em: 29 out. 2020.

HACHICH, W.; FALCONI, F. F.; SAES, J. L.; FROTA, R. G. Q.; CARVALHO, C. S.; NIYAMA, S. *Fundações: teoria e prática*, 2. ed. São Paulo: Pini, 1998. 750p.

JABER, R. Estudo da probabilidade de ruptura de uma estrutura de contenção em gabiões, localizado em Goiânia – Goiás. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás (UFG), Goiânia, GO, 2011. Disponível em: https://eec.ufg.br/up/140/o/ESTUDO_DA_PROBABILIDADE_DE_RUPTURA_DE_UMA ESTRUTURA_DE_CONTEN%C3%87%C3%83O_EM_GABI%C3%95ES__LOCALIZADO_EM_GOI%C3%82NIA_-_GOI%C3%81S.pdf. Acesso em: 31 out. 2020.

KAPT, H. K. *4 Loading and load securing*. Container Handbook, 2020. Available at: http://www.containerhandbuch.de/chb_e/stra/index.html?chb_e/stra/stra_04_03_07.html. Access on 31 oct. 2020.

LUIZ, B. J. *Projeto geotécnico de uma estrutura de contenção em concreto*. Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2014. 114 p. Disponível em: <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10011764.pdf>. Acesso em: 31 out. 2020.

MARANGON, M. *Capítulo 6: Empuxos de terra*. Faculdade de Engenharia: Núcleo de Geotecnia, 2018. Disponível em: <https://www.ufjf.br/nugeo/files/2013/06/MARANGON-2018-Cap%C3%ADtulo-06-Empuxos-de-Terra-20181.pdf>. Acesso em: 31 out. 2020.

MARANGON, M. *Previsão do comportamento de fundações*. Universidade Federal de Juiz de Fora: Núcleo de Geotecnia, 2012. Disponível em: <https://www.ufjf.br/nugeo/files/2009/11/GF-04-Considera%C3%A7%C3%B5es-sobre-funda%C3%A7%C3%B5es-diretas-20121.pdf>. Acesso em: 31 out. 2020.

MARANGON, M. *Unidade 03 – geotecnia de contenções*. Universidade Federal de Juiz de Fora: Núcleo de Geotecnia, 2006. Disponível em: http://www.ufjf.br/nugeo/files/2009/11/togot_Unid-03-GeoContencoes-Parte01-2006-2.pdf. Acesso em: 31 out. 2020.

MARCELLI, M. *Sinistros na construção civil: causas e soluções para danos e prejuízos em obras*. São Paulo: Pini, 2007.

NASCIMENTO, Roney Gomes. *Estabilização de taludes*. Defesa Civil do Espírito Santo, 2020. Disponível em: https://defesacivil.es.gov.br/Media/defesacivil/Capacitacao/Material%20Did%C3%A1tico/CBPRG%20-%202017/Estabiliza%C3%A7%C3%A3o_de_Taludes.pdf. Acesso em: 21 set. 2020.

OLIVEIRA, C. F.; BRANCO, L. A. M. N.; TAVARES, K. A. *Análise de deslizamento de muro de arrimo provocado por falha no projeto*. 2018. Disponível em: <http://www.nppg.org.br/patorreb/files/artigos/80513.pdf>. Acesso em: 31 out. 2020.

PUNMIA, B. C.; JAIN, A. K.; JAIN, A. K. *Comprehensive Rcc.Designs*. New Delhi: Laxmi Publications, 1998. Available at: <https://books.google.com.br/books?id=rDBYl8iTaWsC&lp-g=PA469&dq=Counterfort&hl=pt-BR&pg=PP1#v=onepage&q=Counterfort&f=false>. Access on 31 oct. 2020.

REIS, A. A. P.; PRADO, L. F. N. *Análise de sensibilidade probabilística aplicada ao tombamento em uma estrutura de contenção*. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Federal São João del-Rei (UFSJ), Ouro Branco, MG, 2018. Disponível em: <https://ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/infrageo/ANALISE%20DE%20SENSIBILIDADE%20PROBABILISTICA.pdf>. Acesso em: 31 out. 2020.

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 (Bacharel em Engenharia Civil) - Centro Universitário do Sul de Minas (UNIS-MG), Varginha, MG, 2016. Disponível em: <http://repositorio.unis.edu.br/bitstream/prefix/174/1/TCC%2002%20%20final%20p%C3%B3s%20banca.pdf>. Acesso em: 29 out. 2020.

SANTANA, R. G. *Análise de soluções de engenharia para estabilização de encostas ocupadas na Região Metropolitana do Recife-PE – estudo de caso: ruptura ocorrida em encosta com ocupação desordenada na UR2, Iburá*. 2006, 181 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, PE, 2006. Disponível em: https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/5555/1/arquivo6174_1.pdf. Acesso em: 31 out. 2020.

VIEIRA JÚNIOR, G. T. *Estudo de comparativo de viabilidade econômica entre muros de arrimo de gravidade, utilizando o gabião comparando com o concreto ciclópico*. 2014. Monografia (Bacharel em Engenharia Civil) – Centro Universitário Sul de Minas (UNIS-MG), Varginha, MG, 2014. Disponível em: <http://repositorio.unis.edu.br/bitstream/prefix/249/1/Trabalho%20de%20conclus%C3%A3o%20de%20curso%20II%20-%20Genesisio%20Junior%20-%20R19-converted.pdf>. Acesso em: 31 out. 2020.