

DRENOS VERTICAIS COMO SOLUÇÃO PARA ACELERAR OS RECALQUES DE UM ATERRO SOBRE SOLO MOLE¹

Samuel Santos de Azevêdo
Maria Isabela Marques da Cunha Bello²

RESUMO

O uso de drenos verticais em depósitos de solos moles promove a aceleração dos recalques por meio da drenagem da água, reduzindo o volume de vazios, aumentando a resistência ao cisalhamento do solo e melhorando a capacidade de suporte. São elementos constituídos por materiais sintéticos que são cravados verticalmente no terreno, dispostos em malha. Este artigo avalia a aplicabilidade de drenos verticais como solução para acelerar os recalques de um aterro construído sobre solos moles, localizado em Recife, Pernambuco. Foram definidas as necessidades do projeto (profundidade dos drenos, tempo e grau de adensamento) e determinada as grandezas geométricas dos geodrenos (diâmetro equivalente, diâmetro de influência, diâmetro da área amolgada), espaçamento entre os geodrenos e quantidade total de geodrenos necessários para um determinado tempo de adensamento. Optou-se pela avaliação para dois tipos de drenos distintos o CX1000 da TDM Brasil e 1S 20.2 da Maccaferri do Brasil, que se diferenciam geometricamente pela espessura da seção transversal. Obteve-se para ambos os casos o comprimento total necessário para cada um dos drenos e os custos estimados. Os resultados obtidos mostraram redução de até 89 anos, se comparado com a situação sem o uso dos drenos, o que possibilitou que as deformações desejadas ocorressem em até 5 anos, tornando evidente a eficiência no uso deste material.

Palavras-chave: Adensamento. Geossintéticos. Ruptura.

VERTICAL DRAINS AS SOLUTION TO ACCELERATE THE SETTLEMENT OF EMBANKMENT ON SOFT SOIL

ABSTRACT

The use of vertical drains in soft soil deposits promotes the acceleration of settlements through the drainage of water, reducing the void volume increasing the shear strength of the soil and improving the support capacity. They are elements made of synthetic materials that are driven vertically into the ground, arranged in mesh. This article evaluates the applicability of vertical drains as a solution to accelerate the settlement of an embankment on soft soil deposit located in Recife, Pernambuco. The parameters of the project were defined (depth of drains, time and degree of consolidation) and the geometrical quantities of the geodrains were

¹ **Como citar este artigo:** AZEVÊDO, S. S.; BELLO, M. I. M. C. Drenos verticais como solução para acelerar os recalques de um aterro sobre solo mole. *ForScience*, Formiga, v. 10, n. 1, e00945, jan./jun. 2022. DOI: 10.29069/forscience.2022v10n1.e945.

² **Autor para correspondência:** Maria Isabela Marques da Cunha Bello, e-mail: isabelamcvbello@hotmail.com.

determined (equivalent diameter, diameter of influence, diameter of the dented area), spacing between the geodrains and the total amount of geodrain drains needed to a certain consolidation time. We opted for the evaluation for two different types of drains, the CX1000 from TDM Brasil and 1S 20.2 from Maccaferri do Brasil, which differ geometrically by the thickness of the cross section. For both cases, the total length required for each of the drains was obtained and the estimated cost. The results obtained showed a reduction of up to 89 years, when compared to the situation without the use of drains, which allowed the desired deformations to occur in up to 5 years, making evident the efficiency in the use of this material.

Keywords: Consolidation. Geosynthetics. Failure.

1 INTRODUÇÃO

Existem várias soluções que permitem a utilização das áreas de solo mole, a escolha de uma delas dependerá de inúmeros fatores como, por exemplo, as condições do solo, o nível de recalque aceitável, o espaço disponível, além de custos e prazos de execução.

Uma das técnicas mais utilizadas para acelerar o processo de adensamento em solos moles é a aplicação de drenos verticais, promovendo a aceleração dos recalques ao diminuir o caminho de drenagem dentro da massa de solo compressível para cerca da metade da distância horizontal entre drenos (ALMEIDA; MARQUES, 2010). Esta técnica pode ser implementada em associação a colocação de uma sobrecarga, podendo também ser conjugada com vácuo e até mesmo com a eletro-osmose (ALVES, 2011). Normalmente, sem a utilização do geodreno, esses recalques só ocorrem ao longo de vários meses, exigindo manutenção constante ou até mesmo a eventual interrupção da área em função das excessivas deformações ocorridas.

Para Terzaghi, Peck e Mesri (1996), o dreno vertical tem como função recolher a água que afluí radialmente ao seu interior e transportá-la verticalmente na direção das fronteiras drenantes com o mínimo de resistência hidráulica possível neste percurso. Entretanto, os drenos devem possuir uma permeabilidade suficientemente pequena para impedir o arraste de finos para o seu interior, o que poderia levar ao seu entupimento (STAPELFELDT; VEPSÄLÄINEN; YIN, 2007).

Os geodrenos são geocompostos drenantes específicos, apresentados em tiras, com cerca de 10 cm de largura e dezenas de metros de comprimento, cujo material é composto por um núcleo de plástico com ranhuras em forma de canaleta, envolto em um filtro de geossintético não tecido de baixa gramatura (SANTOS, 2018). O núcleo drenante permite conduzir a água até à superfície do terreno ou camada drenante superficial. O revestimento

tem como função impedir a entrada de solo no núcleo drenante, permitindo a passagem de água. Na ponta do geodreno existe uma âncora de metal que tem a dupla função de bloquear a entrada de solo no dreno durante a cravação e a de manter o dreno à profundidade desejada (ALVES, 2014).

Dentre as vantagens da utilização dos geodrenos estão a rapidez e facilidade de instalação, que é muito superior se comparado aos drenos verticais de areia, a alta capacidade drenante, uniformidade e qualidade da fabricação industrializada, enquanto a qualidade de drenos de areia depende muito dos materiais e dos sistemas construtivos utilizados (OLIVEIRA; ALMEIDA; MARQUES, 2015).

Quanto à instalação dos geodrenos, sua cravação no solo pode ser realizada de forma estática ou vibratória com equipamentos especializados. Ao ser introduzido no solo, o geodreno provoca perturbação no arranjo do mesmo, provocando deslocamentos e amolgamento do solo envolvente a cada geodreno instalado. Diferentemente do que acontece com os drenos de areia, as perturbações induzidas ao terreno são pequenas devido ao reduzido volume dos drenos (ALVES, 2011).

Este artigo apresenta um estudo sobre a aplicabilidade de geodrenos verticais como solução para acelerar os recalques de um depósito de solo mole, localizado em Recife, Pernambuco. Para o dimensionamento, foram utilizados resultados dos coeficientes de adensamento obtidos em ensaios de laboratório (oedométrico), sendo definidas as necessidades do projeto (profundidade dos drenos, tempo e grau de adensamento), e determinadas as grandezas geométricas dos geodrenos. Foram considerados dois tipos de geodrenos comerciais, sendo comparados os custos envolvidos.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Em um projeto de drenagem, a escolha do geodreno e suas especificações dependem das características da obra, da profundidade do subsolo, da variabilidade das camadas e dos parâmetros geotécnicos dos solos.

Este item apresenta a caracterização da área de estudo, determinação das variáveis utilizadas no projeto, procedimento para o levantamento dos dados, assim como para o dimensionamento dos geodrenos.

Foram definidas as necessidades do projeto (profundidade dos drenos, tempo e grau de adensamento) e determinada as grandezas geométricas dos geodrenos (diâmetro equivalente,

diâmetro de influência e diâmetro da área amolgada). Foi estimado o espaçamento entre os geodrenos e, finalmente, determinado a quantidade de drenos necessários para um determinado tempo de adensamento.

Na Tabela 1 está apresentado o roteiro para o dimensionamento dos geodrenos realizados nesta pesquisa. Observa-se 6 (seis) passos utilizados neste roteiro adaptado de Santos (2018), iniciando com entendimento do caso, definição do perfil típico e parâmetros geotécnicos e, concluindo com a determinação da quantidade de geodrenos necessários e a estimativa de custos para implementação da solução.

O dimensionamento do sistema de drenagem foi feito levando em consideração dois tipos de geodrenos: CX1000 da TDM Brasil e 1S 20.2 da Maccaferri do Brasil. Também foi realizado um comparativo com a situação com uso de geodrenos e sem em relação ao tempo total de adensamento.

Tabela 1 - Roteiro para o dimensionamento dos geodrenos

| PROCEDIMENTOS | |
|----------------------|--|
| Passo 1 | Entendimento do caso, definição do perfil típico e parâmetros geotécnicos. |
| Passo 2 | Definir as necessidades do projeto (profundidade dos drenos, tempo e grau de adensamento). |
| Passo 3 | Determinar as grandezas geométricas dos geodrenos (diâmetros equivalentes, de influência, da área amolgada). |
| Passo 4 | Estimar o espaçamento entre os geodrenos. |
| Passo 5 | Comparar os valores de espaçamento e número de geodrenos entre os tipos considerados, e o tempo de adensamento com uso e sem o uso de geodrenos. |
| Passo 6 | Determinar a quantidade de geodrenos por tipo e orçar a solução proposta. |

Fonte: Azevêdo (2020) adaptado de Santos (2018).

2.1 Caracterização da área de estudo e histórico da obra

Segundo Bello (2004), o terreno com cerca de 10.350 m² localiza-se na BR-101, Recife/PE. Foram construídos 3 galpões, sendo um de grande porte com alvenarias de fechamento lateral (50 x 40 m), onde ocorreu a ruptura. É apresentada na Figura 1 a posição dos galpões, bem como as locações dos furos de sondagem, amostragem e ensaio de palheta.

Os galpões foram projetados em estruturas pré-moldadas de concreto armado, cujos pilares têm fundação superficial tipo bloco isolado de pedra rachão. O piso foi projetado com uma laje armada de 15 cm de espessura, assente diretamente no terreno.

As sondagens mostraram um perfil composto inicialmente por uma camada de aterro de argila silto-arenosa, mal compactado, com cerca de 6 m de espessura. Abaixo do aterro

tem-se uma camada de argila siltosa, muito mole a mole com espessura próxima de 1 m. Segue-se uma camada de turfa com argila orgânica, muito mole a mole, com cerca de 12 m de profundidade. Até o limite das sondagens (em 30 m de profundidade), segue-se uma camada de argila siltosa, média a rija. O nível d'água situa-se em torno de 3,75 m de profundidade.

No início da construção, o terreno que já se encontrava aterrado com metralha e lixo, foi regularizado com um aterro compactado com cerca de 1 m de espessura. Executou-se um muro de arrimo de gabião com altura entre 3 e 6 m (Figura 2).

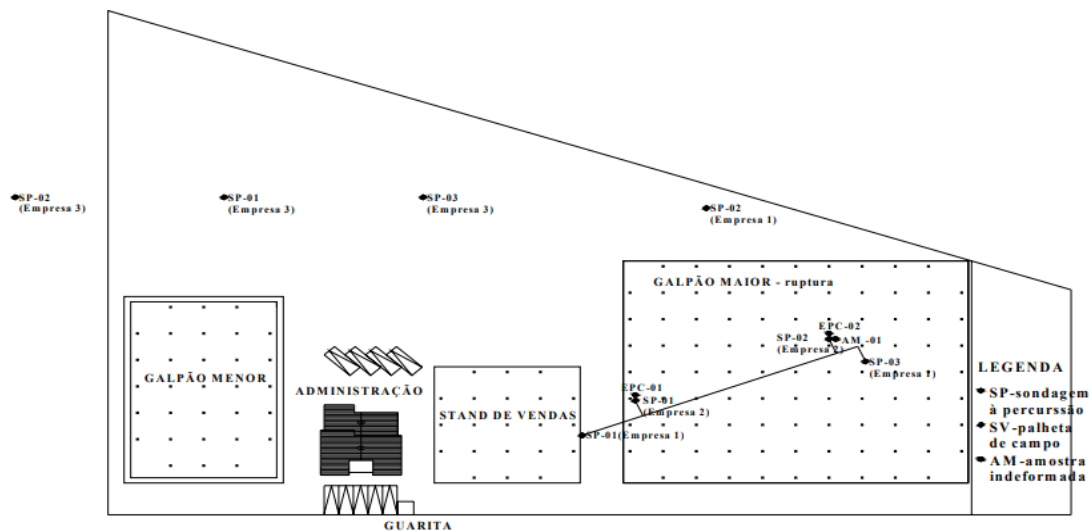


Figura 1 - Localização dos furos de sondagem, ensaio de palheta e retirada de amostras
Fonte: Bello (2004).

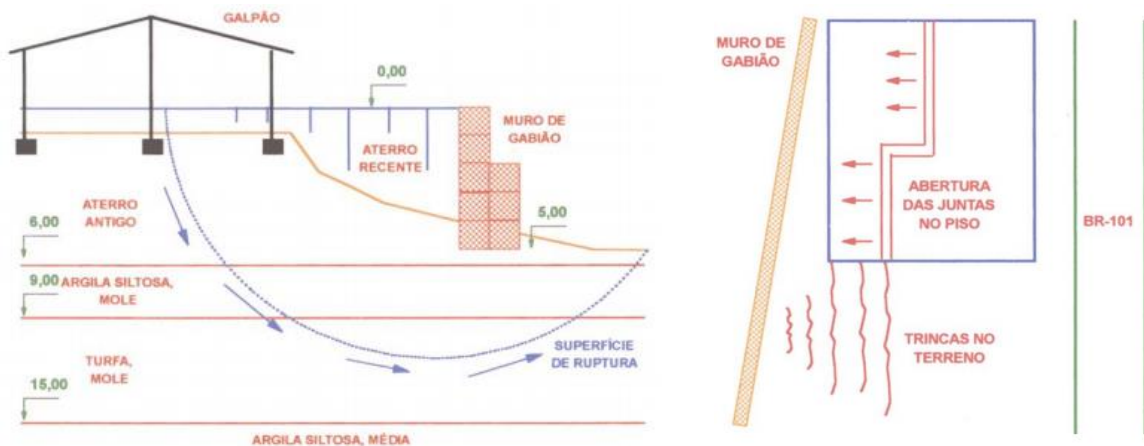


Figura 2 - Mecanismo e evidências de escoamento lateral do terreno
Fonte: Bello (2004).

Durante a execução de terraplenagem, ocorreu deslizamento em um canto do terreno vizinho, onde foram observadas várias fissuras nas alvenarias e abertura das juntas de dilatação do piso. Concluiu-se que o terreno apresentava uma componente vertical de

deslocamento, representada pelo recalque das camadas argilo-turfosas moles, devido ao peso próprio do aterro e da estrutura e, uma componente horizontal, devido ao escoamento lateral das camadas na direção no desnível do terreno. O deslocamento das alvenarias dos pilares de concreto é um indício da ocorrência de recalques.

Na época foram propostas duas soluções para combater os movimentos identificados: (a) reforço de fundações através de estacas metálicas; e (b) execução de bermas no fundo do terreno. Foi proposto monitorar o desempenho através da instalação de pinos nos pilares e marcos superficiais no terreno, com controle periódico de topografia da obra e, definir a necessidade de intervenções. Por decisão do proprietário, não houve monitoramento do local, ocorrendo neste período, a ruptura do terreno.

Bello (2004) comenta que os ensaios de caracterização e adensamento foram realizados para a amostra de solo retirada a 11 m de profundidade. Como resultados dos ensaios de caracterização têm-se: umidade natural ($W = 223 \%$); Limite de liquidez ($LL = 76 \%$); Limite de plasticidade ($LP = 57 \%$); Índice de plasticidade ($IP = 19 \%$); Limite de contração ($LC = 37 \%$). O teor de matéria orgânica foi de 67% e peso específico de $11,91 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$. A curva granulométrica apresentou alta percentagem de argila (67%) e silte (27%), respectivamente.

A partir da curva tensão deformação resultante do ensaio de adensamento vertical determinou-se os parâmetros; índice de compressão ($C_c = 1,9$) e de inchamento ($C_s = 0,3$), índice de vazios inicial ($e_0 = 4,546$) e tensão de pré-adensamento ($\sigma'_{vm} = 42,5 \text{ kPa}$).

A estimativa do coeficiente de adensamento vertical (c_v) foi feita através do Método de Taylor. O valor encontrado foi de $1,2 \times 10^{-8} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$. Na ausência de ensaios de campo podem-se, em análises preliminares, estimar o valor do coeficiente de adensamento horizontal (c_h) através do c_v obtidos em ensaio de adensamento oedométrico convencional (Equação 1).

$$c_h = \frac{k_h}{k_v} \times c_v \quad (1)$$

A relação entre k_h e k_v é chamada de razão de permeabilidade em argilas e dependerá de sua natureza. Almeida e Marques (2010) recomenda que para argilas brasileiras seja considerada uma razão de permeabilidade entre 1,5 e 2.

2.2 Perfil típico e parâmetros geotécnicos utilizados no dimensionamento dos geodrenos

Para adoção de um perfil típico usado no dimensionamento dos geodrenos foram extrapoladas algumas camadas de solo de mesmas características geotécnicas. Assim, foi considerado um perfil típico com uma camada única de argila mole com 13m de espessura e uma de argila arenosa com 11 m de espessura.

2.3 Adensamento por drenagem radial

Nos casos dos drenos verticais, caso a drenagem vertical na massa de solo não seja considerada, a drenagem radial pura é dada pela Equação (2).

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_h \times \left[\frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right] + \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} \quad (2)$$

A equação para drenagem radial pura foi solucionada por Barron (1948) considerando um cilindro de solo com um dreno vertical também em forma de cilindro para a condição de deformações verticais iguais, obtendo assim o grau de adensamento médio da camada (\bar{U}_h).

$$\bar{U}_h = 1 - e^{-\left[\frac{8T_h}{Fn}\right]} \quad (3)$$

$$T_h = \frac{C_h t}{d_e} \quad (4)$$

$$F(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1} \cdot \ln(n) - \frac{3n^2 - 1}{4n^2} \cong \ln(n) - 0,75 \quad (5)$$

$$n = \frac{d_e}{d_w} = \frac{R}{r_d} \quad (6)$$

Onde: d_e é o diâmetro de influência do dreno; d_w é o diâmetro do dreno ou o diâmetro equivalente de um geodrenos com seção retangular; T_h é o fator tempo para a drenagem horizontal; $F(n)$ é a função da densidade dos drenos; R é a semi-distância entre os drenos; r_d é o raio do dreno ou o raio equivalente de um geodrenos com seção retangular; n é a relação entre o diâmetro de influência e o diâmetro equivalente do geodreno.

2.4 Dimensionamento de geodrenos

Para o dimensionamento dos geodrenos foram realizados cálculos e considerações geométricas do diâmetro de influência e espaçamento, diâmetro equivalente e a influência do amolgamento na instalação do dreno. A resistência hidráulica do dreno não foi considerada pois, segundo Hansbo (2005) a maioria dos geodrenos disponíveis no mercado tem capacidade de descarga suficiente, de forma a tornar essa questão desprezível em projeto.

Foram utilizados dois tipos de dreno vertical pré-fabricado produzidos por fabricantes distintos, mas conformados por camada polimérica, coberto em ambas as faces por um geotêxtil permeável não tecido. A fixação do conjunto se dá a partir de um envolvimento em membrana de látex. As dimensões do primeiro dreno (CW1000) são 10 cm de largura e 0,4 cm de espessura, enquanto o segundo dreno (1S 20.2) possui dimensões de 10 cm de largura e 1,6 cm de espessura.

2.4.1 Diâmetro de influência e espaçamento

Os geodrenos foram dimensionados para instalação em malhas triangulares de lado igual a l . A malha e a área de influência de cada geodreno estão representadas na Figura 3.

O diâmetro de influência da malha triangular foi calculado igualando a área do hexágono com a do círculo equivalente (Equação 7).

$$de = 1,05l \quad (7)$$

O espaçamento mínimo entre os drenos varia em torno de 1,5 m, pois a partir desses valores ocorre sobreposição de áreas amolgadas, afetando diretamente a permeabilidade do solo, causando sua redução e impactando no valor do coeficiente de adensamento horizontal, tornando a alternativa do uso de drenos ineficaz (ALMEIDA; MARQUES, 2010).

2.4.2 Diâmetro equivalente dos geodrenos

Os geodrenos possuem formato retangular e por isso suas dimensões devem ser representadas por um diâmetro equivalente (dw) conforme apresentado na Figura 4. A malha triangular, por consequência, requer uma aproximação da área do hexágono equivalente e resultante da malha à área circular de influência (de) de cada geodreno.

Para a determinação do diâmetro equivalente do dreno foi utilizada a Equação (8), proposta por Rixner; Kraemer; Smith (1986) e por Hansbo (1987).

$$dw = \frac{2x(a+b)}{\pi} \quad (8)$$

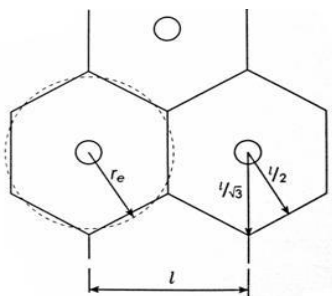


Figura 3 – Malha de drenos triangular
Fonte: Oliveira, Almeida e Marques (2010).

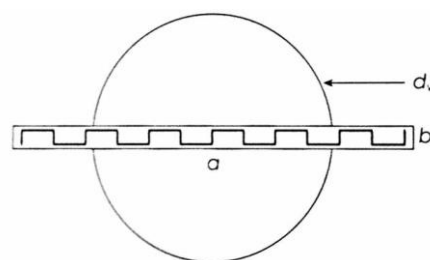


Figura 4 – Diâmetro equivalente do geodreno
Fonte: Oliveira, Almeida e Marques (2010).

2.4.3 Influência do amolgamento na instalação do dreno

Considerou-se o amolgamento do solo compressível ao redor e ao longo do dreno, devido a sua instalação. O amolgamento reduz a permeabilidade horizontal do solo e, em consequência, a velocidade do adensamento (OLIVEIRA; ALMEIDA; MARQUES, 2015).

Deve-se acrescentar ao valor de $F(n)$, no cálculo do adensamento com drenagem puramente radial, o valor de F_s (HANSBO, 1987):

$$F_s = \left[\left(\frac{k_h}{k'_h} \right) - 1 \right] \times \ln \left(\frac{d_s}{d_w} \right) \quad (9)$$

Onde: d_s é o diâmetro da área afetada pelo amolgamento; $d_s = 2 d_m$;

O diâmetro do mandril de cravação, d_m é calculado pela Equação 10 (HANSBO, 1987).

$$d_m = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot w \cdot t}$$

Onde: w e t são dimensões de mandril retangular (BERGADO; MANIVANNAN; BALASUBRAMANIAM, 1996); k'_h é a permeabilidade horizontal da área amolgada.

O valor de k'_h depende da realização de ensaios especiais, raramente realizados. Foi utilizado a relação proposta por Hansbo (1987) devido à falta de dados (Equação 11).

$$\frac{k_h}{k'_h} = \frac{k_h}{k_v} \quad (11)$$

A escolha do mandril foi em função de se ter a menor área possível para que o amolgamento fosse minimizado. Almeida e Marques (2010) recomendam que para espessuras de solo muito mole de até 15 m aproximadamente, por questões estruturais do equipamento de cravação, a área externa do mandril seja da ordem de 70 cm². Um mandril de 12 cm x 6 cm foi escolhido para os cálculos, mas como o segmento tem profundidade de 13 m, talvez seja necessário reforçá-lo para esse trecho. No entanto, o amolgamento aumentará, sendo necessário recalcular o tempo em que ocorrerá o adensamento pretendido no projeto.

2.4.4 Roteiro de Dimensionamento

O dimensionamento de um sistema de drenos tem como objetivo determinar o espaçamento entre os drenos, a fim de se obter o grau de adensamento médio da camada desejada em um período considerado aceitável. O dimensionamento foi feito considerando as hipóteses simplificadoras de Terzaghi (ANO).

Foi utilizado o roteiro de cálculo com o auxílio da planilha desenvolvida por Santos (2018). Foram definidos os parâmetros geotécnicos ch , cv e $kh/k'h$ e o padrão de cravação da malha. A partir daí, determinou-se as grandezas geométricas dos drenos, dw , ds , dm e h_{arg} .

Considerou-se no projeto um grau de adensamento médio desejado para a camada de 90 % e um tempo de projeto aceitável de 5 anos. Admitiu-se drenagem radial devido à drenagem vertical ter mais influência para camadas de solo inferiores à 10 m e, por ser mais conservativa. Foi realizada uma estimativa inicial para o espaçamento l e calculado o valor de de .

Foi encontrado o efeito do amolgamento do solo devido à instalação do dreno, sendo este valor adicionado à função de densidade de drenos determinada anteriormente através da Equação 5, na análise de adensamento com drenagem puramente radial. Neste tipo de drenagem $\bar{U}_h = \bar{U}$, logo pode-se isolar o fator tempo T_h (grau de adensamento médio \bar{U}_h da camada), obtendo a Equação (12). O tempo necessário para se obter o adensamento desejado está representado na Equação (13). O valor de l (espaçamento) foi reduzido tentativamente até que o tempo calculado fosse menor ou igual ao desejável para o projeto.

$$T_h = \frac{-\ln(1-\bar{U}_h) \times F(n)}{8} \quad (12)$$

$$t_{calc} = \frac{T_h \times d_e^2}{c_h} \quad (13)$$

Para o cálculo do tempo de adensamento na situação sem o uso de drenos, utilizou-se a Equação (14), onde T é o fator tempo; t é o tempo estimado de 1 ano de adensamento; H_d é a altura de drenagem do trecho, considerada metade da altura da camada de argila.

$$t = \frac{T \times H_d}{c_v} \tag{14}$$

Determina-se a porcentagem de recalque a partir do gráfico apresentado por Pinto (2006). Para um adensamento de 90 %, H_d é a altura de drenagem do trecho, considerada metade da altura da camada de argila e, c_v é o coeficiente de adensamento vertical do trecho.

O Quadro 1 apresenta a planilha de cálculo e simulações para o dimensionamento do Dreno 1. Na última simulação, mantendo o valor da razão de permeabilidade e alterando minimamente o espaçamento dos drenos, o tempo máximo para adensamento em 5 anos considerado como necessidade de projeto, é ultrapassado.

| UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE ENGENHARIA CIVIL SAMUEL AZEVEDO DIMENSIONAMENTO DE GEODRENOS UFPE | | Dreno 1 - CX1000 | | DIMENSÕES DO GEODRENO | | PROPRIEDADES DO GEODRENO | | DIMENSÕES DO MANDRIL | |
|---|-------------|----------------------------------|-------------|----------------------------------|-------------|----------------------------------|-------------|----------------------------------|----------|
| | | Tempo aceitável (anos) | 5,0 | a (mm) | 100 | b (mm) | 4 | w (mm) | 120 |
| | | Padrão de cravação | triangular | dw (mm) | 66,21 | ds (mm) | 191,49 | t (mm) | 60 |
| | | dm (mm) | 95,75 | | | | | | |
| | | Tipo de drenagem | radial | | | | | | |
| ATERRO BR-101 (simulação 1) | | ATERRO BR-101 (simulação 2) | | ATERRO BR-101 (simulação 3) | | ATERRO BR-101 (simulação 4) | | | |
| kh/k'h | 1,5 | kh/k'h | 1,75 | kh/k'h | 2 | kh/k'h | 2 | kh/k'h | 2 |
| harg (m) | 13 | harg (m) | 13 | harg (m) | 13 | harg (m) | 13 | harg (m) | 13 |
| ch (m ² /s) | 0,000000018 | ch (m ² /s) | 0,000000021 | ch (m ² /s) | 0,000000024 | ch (m ² /s) | 0,000000024 | ch (m ² /s) | 2,4E-08 |
| cv (m ² /s) | 0,000000012 | cv (m ² /s) | 0,000000012 | cv (m ² /s) | 0,000000012 | cv (m ² /s) | 0,000000012 | cv (m ² /s) | 1,2E-08 |
| comprimento (m) | 20 | comprimento (m) | 20 | comprimento (m) | 20 | comprimento (m) | 20 | comprimento (m) | 20 |
| de (m) | 1,79 | de (m) | 1,75 | de (m) | 1,89 | de (m) | 1,80 | de (m) | 1,90 |
| Espaçamento entre os drenos | 1,70 | Espaçamento entre os drenos | 1,75 | Espaçamento entre os drenos | 1,80 | Espaçamento entre os drenos | 1,80 | Espaçamento entre os drenos | 1,81 |
| U | 0,9 | U | 0,9 | U | 0,9 | U | 0,9 | U | 0,9 |
| Fs (smear) | 0,5310 | Fs (smear) | 0,7965 | Fs (smear) | 1,0620 | Fs (smear) | 1,0620 | Fs (smear) | 1,0620 |
| n | 26,36 | n | 27,75 | n | 28,55 | n | 28,70 | n | 28,70 |
| F(n) | 3,075 | F(n) | 3,370 | F(n) | 3,66 | F(n) | 3,67 | F(n) | 3,67 |
| Uh | 0,9 | Uh | 0,9 | Uh | 0,9 | Uh | 0,9 | Uh | 0,9 |
| Th | 0,885 | Th | 0,970 | Th | 1,0545 | Th | 1,0561 | Th | 1,0561 |
| tcalic (dias) | 1813,49 | tcalic (dias) | 1804,94 | tcalic (dias) | 1816,47 | tcalic (dias) | 1816,47 | tcalic (dias) | 1839,49 |
| tcalic (anos) | 4,97 | tcalic (anos) | 4,95 | tcalic (anos) | 4,98 | tcalic (anos) | 4,98 | tcalic (anos) | 5,04 |
| tcalculado < tpretendido? | SIM | tcalculado < tpretendido? | SIM | tcalculado < tpretendido? | SIM | tcalculado < tpretendido? | SIM | tcalculado < tpretendido? | NÃO |
| Cálculo sem utilização de drenos | | Cálculo sem utilização de drenos | | Cálculo sem utilização de drenos | | Cálculo sem utilização de drenos | | Cálculo sem utilização de drenos | |
| Hd (m) | 6,5 | Hd (m) | 6,5 | Hd (m) | 6,5 | Hd (m) | 6,5 | Hd (m) | 6,5 |
| T | 0,848 | T | 0,848 | T | 0,848 | T | 0,848 | T | 0,848 |
| tcalic (dias) | 34556,33 | tcalic (dias) | 34556,33 | tcalic (dias) | 34556,33 | tcalic (dias) | 34556,33 | tcalic (dias) | 34556,33 |
| tcalic (anos) | 94,67 | tcalic (anos) | 94,67 | tcalic (anos) | 94,67 | tcalic (anos) | 94,67 | tcalic (anos) | 94,67 |

Quadro 1 – Planilha de dimensionamento para o Dreno 1
Fonte: Azevêdo (2020) adaptado de Santos (2018).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Grandezas relacionadas ao geodreno

A Tabela 2 apresenta os valores obtidos para o diâmetro do mandril de cravação (dm), diâmetro equivalente do dreno (dw), diâmetro da área afetada pelo amolgamento (ds) e amolgamento do solo (F_s). Considerou-se um mandril de 120 x 60 mm. Os valores encontrados são aplicados a toda a área, pois só dependem das dimensões do dreno e do mandril de cravação.

Tabela 2 – Valores obtidos de d_m , d_w , d_s e F_s para os geodrenos

| Dreno | Diâmetro do mandril de cravação, d_m (mm) | Diâmetro equivalente do dreno, d_w (mm) | Diâmetro da área amolgada, d_s (mm) | Amolgamento do solo, F_s |
|-------|---|---|---------------------------------------|----------------------------|
| 1 | 95,75 | 66,21 | 191,49 | 0,53 |
| 2 | 95,75 | 73,85 | 191,49 | 0,48 |

Fonte: Azevêdo (2020) adaptado de Santos (2018).

Para encontrar o diâmetro de influência do dreno foi necessário estimar um valor inicial para o espaçamento entre os drenos. A partir dessa estimativa foi possível obter o valor para o tempo de adensamento da camada de argila. O processo de cálculo consiste em tentativa e erro, pois deve-se reduzir o espaçamento até que o tempo de adensamento calculado seja inferior ao tempo de adensamento considerado para o projeto. Com a malha projetada e com as especificações dos geodrenos pode-se calcular os tempos necessários para que o percentual de recalque por adensamento primário atinja 90 %.

A Figura 5 mostra o diâmetro de influência e o espaçamento necessário sendo iguais aos valores médios de 1,9 e 1,8, respectivamente. Os resultados obtidos estão em conformidade com o indicado em DNER (1990) e por Almeida e Marques (2010), este entre 1,5m a 3,0m.

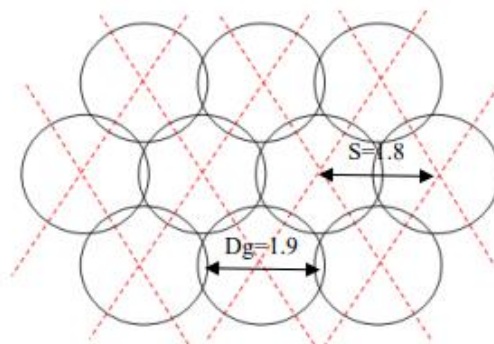


Figura 5 - Desenho esquemático de implantação da malha
Fonte: Azevêdo (2020).

3.2 Comparação do tempo de adensamento com e sem uso de geodrenos

Para as simulações considerando espaçamento entre os drenos acima de 1,5 m, de modo que atendesse ao critério para o tempo de adensamento, obteve-se o tempo de 4,98 anos para o dreno 1 e 4,97 para o dreno 2. O valor do tempo de adensamento sem uso de geodrenos foi de 94,67 anos. As Figuras 6 e 7 mostram os resultados para espaçamento e número de drenos, respectivamente. A Figura 8 mostra os resultados do tempo de adensamento em anos com e sem uso de drenos. Com o uso de drenos notou-se um acentuado ganho de tempo,

reduzindo o tempo de adensamento da camada de solo de vários anos para o tempo desejado de cinco anos, viabilizando construções no aterro. Os valores encontrados tornam evidente a eficiência no uso dos geodrenos como solução de construção de obras em aterros de solo mole.

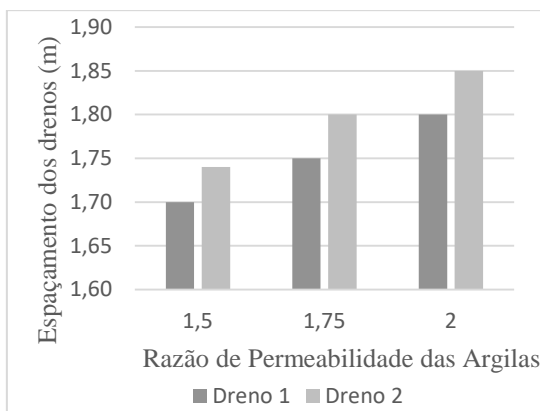


Figura 6 – Comparativo entre os espaçamento e número de drenos por tipo
Fonte: Azevêdo (2020).

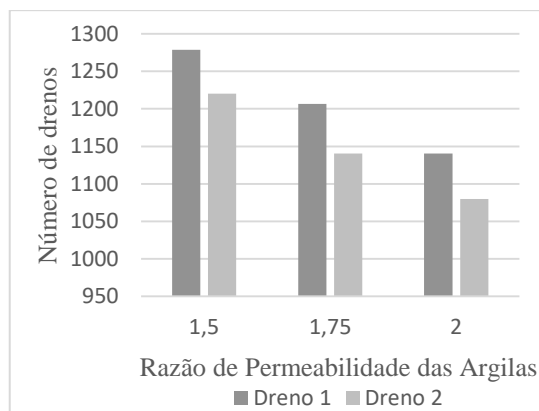


Figura 7 – Quantidade de drenos (uni)
Fonte: Azevêdo (2020).

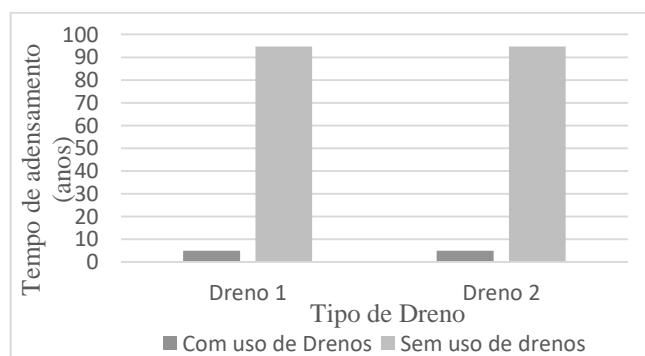


Figura 8 – Tempo de adensamento em anos com e sem uso de drenos
Fonte: Azevêdo (2020).

Os resultados mostram que há vantagem na utilização de geodrenos, em termos de tempo para obtenção do grau de adensamento pretendido. Ficou evidenciado que para os geodrenos comerciais atuais o valor de suas dimensões a e b, apresentam, portanto, a relação de a muito maior do que b, que implica em diferença insignificante em optar por um ou outro geodrenos em relação ao tempo final de adensamento, ficando como critério econômico a ser estudado.

Como esperado, quanto maior as dimensões do dreno maior seria sua área de influência e, conseqüentemente, o espaçamento entre eles seria maior. Foi verificado também

que de forma análoga à ideia do espaçamento, a área recoberta por um dreno maior seria de influência igualmente maior, sendo assim necessitaria de um número de drenos menor.

A ausência de dados experimentais para o coeficiente de adensamento horizontal (c_h), forçou o uso da relação através da razão entre os coeficientes de permeabilidade e o coeficiente de adensamento vertical. Este destaque é dado, pois a relação no solo *in loco* pode ser de um c_h muito maior, o que pode acelerar ainda mais o processo de adensamento. Sendo assim, através das Figuras 12 e 13 verificamos também que para a curta variação da relação entre k_h e k_v não há tanta diferença no tempo de adensamento, conforme citado por Almeida e Marques (2010).

3.3 Proposta de intervenção e orçamento da solução

Para instalação dos geodrenos seria necessário inserir uma camada de material drenante e permeável acima do aterro e, abaixo de outra camada constituída de material de jazidas para evitar a dispersão da camada permeável que pode ser dispersa sob ação de intempéries.

Para execução dos geodrenos, deve-se obedecer a sequência: (a) corte do terreno até a cota de -3,00 m; (b) execução dos drenos até a cota de -19,00 m; (c) execução de colchão de areia com 50 cm de espessura; (d) execução de camada de 1 m de espessura de aterro.

A área destinada a instalação dos geodrenos tem dimensões de 38 m x 41 m, totalizando aproximadamente 1.600 m² de área. Diante da similaridade entre os valores em relação ao tempo de adensamento variando a razão dos coeficientes de permeabilidade, para uniformizar com os melhores tempos optou-se para um estudo comparativo entre os dois drenos aplicados com uma razão igual a 2. Sendo assim seriam necessários 1141 drenos do tipo CX1000 e 1080 drenos do tipo 1S 20.2. Como são 16 m de profundidade que devem ser atravessados por cada dreno, seriam necessários cerca 18.256 m do dreno CX1000 e cerca de 17.280 m do tipo 1S 20.2.

Madeiro (2016) realizou análise de viabilidade técnica e econômica de duas soluções para construção em solos moles. Prevendo a cravação dos geodrenos, ele estimou um valor unitário de 6,20 R\$/m, além de um custo associado a mobilização e transporte dos equipamentos de cravação no valor de R\$170.000,00.

No valor de mobilização considera-se a localidade, a disponibilidade no estado ou estados vizinhos para estimar um valor para os custos da mobilização desses equipamentos.

Assim, foram feitas correções para o valor por metro de insumo, baseando-se no Índice Nacional da Construção Civil para a região Nordeste, disponível no site do IBGE (2020). Para julho de 2020, a variação foi de 2,74 % e valor corrigido de R\$ 7,17.

Na Tabela 3 estão os custos relativos à utilização de cada dreno. Tendo como base os custos considerados por Madeiro (2016) e os acréscimos dos custos de mobilização, o valor médio total foi de aproximadamente R\$ 297.374,88 para implantação da solução. Deve-se incluir ainda, na prática, os custos de instalação (equipamento e mão de obra).

Tabela 3 – Estimativa de custos relativos à utilização de cada dreno

| Dreno | Comprimento(m) | Valores (R\$) | | | |
|---------|----------------|---------------|------------|------------------------------|------------|
| | | Unitário | Insumo | Mobilização e Desmobilização | Total |
| CX 1000 | 18256 | 7,17 | 130.873,24 | 170.000,00 | 300.873,24 |
| 1S 20.2 | 17280 | 7,17 | 123.876,51 | 170.000,00 | 293.876,51 |

Fonte: Azevêdo (2020).

4 CONCLUSÕES

Observou-se que os geodrenos podem reduzir o tempo necessário para que o recalque por adensamento primário atinja 90 % em 5 anos. Para tanto seriam necessários 1.141 drenos do tipo CX1000, totalizando um comprimento de 18.256 m e custando R\$ 300.873,24, ou então 1.080 drenos 1S 20.2, com comprimento total de 17.280 m e que custaria R\$ 293.876,51. Sem a utilização de geodrenos, o tempo de adensamento seria de 94,67 anos.

O uso de geodrenos mostrou-se eficiente, pois apresentou resultados favoráveis em relação ao tempo de adensamento da camada de solo mole, reduzindo significativamente esse tempo (cerca de 1/19 do tempo total) e viabilizando uma futura obra no local estudado.

REFERÊNCIAS

ALVES, R. M. M. **Estudo de modelação da consolidação acelerada por drenos verticais tomando em consideração a fluência do terreno**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Nova de Lisboa, [s. l.], 2011. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10362/5890>. Acesso em: 10 de junho 2020.

ALVES, N. S. O. **Estudo do comportamento de aterros reforçados sobre solos moles com utilização de drenos verticais pré-fabricados**. 2014. 354 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3145/tde-03112014-153454/publico/DISS_NelsonSantosdeOliveiraAlves.pdf. Acesso em: 11 de junho 2020.

ALMEIDA, M. S. S.; MARQUES, M. E. S. **Aterros sobre solos moles: projeto e desempenho**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

AZEVEDO, S. S. **Drenos verticais como solução para acelerar os recalques de um aterro sobre solo mole**. 2020. 20 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Campus Agreste, Caruaru, 2020.

BARRON, R. A. **Consolidation of fine-grained soils by drain wells**. Trans. ASCE 113, n. 2346, p. 718-742, 1948. Disponível em: <https://doi.org/10.1061/TACEAT.0006098>. Acesso em: 20 agosto 2020.

BELLO, M. I. M.C. V. **Estudo de ruptura em aterros sobre solos moles; aterro do galpão localizado na BR-101 - PE. 2004**. 231 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/5692>. Acesso em: 23 abril 2020.

BERGADO, D. T.; MANIVANNAN, R.; BALASUBRAMANIAM, A. S. **Proposed criteria for discharge capacity of prefabricated vertical drains**. v. 14, n. 9, p. 481–505, 1996. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0266-1144\(96\)00028-3](https://doi.org/10.1016/S0266-1144(96)00028-3). Acesso em: 23 julho 2020.

DNER. **Manual de projeto e execução de aterros sobre solos moles**. Rio de Janeiro: Geomecânica S/A, 1990. 227 p.

HANSBO, S. **Design aspects of vertical drains and lime column installation**. Proc. 9th Southeast Asian Geotechnical Conference, v. 2, n. 8, p. 1-12, 1987. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0266-1144\(96\)00028-3](https://doi.org/10.1016/S0266-1144(96)00028-3). Acesso em: 23 julho 2020.

HANSBO, S. **Experience of consolidation process from test areas with and without vertical drains**. Elsevier Geo-Engineering Book Series Volume 3, Chapter 1, Pages 3-49. 2005. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1571-9960\(05\)80004-7](https://doi.org/10.1016/S1571-9960(05)80004-7). Acesso em: 23 julho 2020.

IBGE. Indicadores IBGE: Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil: SINAPI. <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=7242>. 2020. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/242/ind_sinapi_2020_setembro.pdf . Acesso em: 20 setembro 2020.

MADEIRO, H. U. R. **Estudo de viabilidade técnica e econômica para projeto geotécnico de aterro sobre solo mole: aplicação ao caso do trecho rodoviário Ramo 300, Barra da Tijuca, Rio de Janeiro**. 2016. 65 p. Monografia Conclusão da Graduação (Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016. . Disponível em: <http://www.repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10016706.pdf> . Acesso em: 12 de janeiro 2020.

OLIVEIRA, H. M.; ALMEIDA, M. S. S.; MARQUES, M. E. S. **Manual brasileiro de geossintéticos**. 2. ed. São Paulo: Blucher, ISBN: 978-85-2120-926-3, 2015.

PINTO, C. de S. **Curso básico de mecânica dos solos: em 16 aulas**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

RIXNER, J. J.; KRAEMER, S. R.; SMITH, A. D. **Prefabricated vertical drains**, v. I, II and III: Summary of Research Report-Final Report. Federal Highway Admin., Report No. FHWA-RD-86/169, Washington D.C, 433 p. 1986. Disponível em: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/25323>. Acesso em: 14 maio 2020.

SANTOS, M. M. A. **Dimensionamento de godrenos para um aterro sobre solo mole, a partir de coeficientes de adensamento obtidos em ensaios oedométricos e de piezocone**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Campos Agreste, Caruaru, 2018.

STAPELFELDT, T.; VEPSÄLÄINEN, P.; YIN, Z. Y. **Preloading and vertical drains**. Helsínquia: Helsinki University of Technology. 2007.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B.; MESRI, G. **Soil mechanics in engineering practice**. 3. ed., New York: John Wiley and Sons, Inc., 1996.

DADOS DOS AUTORES

Maria Isabela Marques da Cunha Vieira Bello

E-mail: isabelamcvbello@hotmail.com

Curriculum lattes: <http://lattes.cnpq.br/6381756574084574>

Graduação em Engenharia Civil pela Universidade de Pernambuco, mestrado e doutorado em Engenharia Civil - área Geotecnia pela Universidade Federal de Pernambuco. Atualmente realiza pós-doutorado sênior na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. É professora adjunta do Curso de Graduação de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco - Centro Acadêmico do Agreste, Caruaru. É professora permanente do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental - PPGECAM, na linha de pesquisa Desenvolvimento do Semi-árido, desenvolvendo estudos sobre solos expansivos, interação solo-estrutura, gestão de resíduos de construção e demolição e indicadores de sustentabilidade. Tem experiência na área de Engenharia Civil, com ênfase em ensaios geotécnicos de campo e de laboratório, e projetos de aterros Sobre Solos Moles.

Samuel Santos de Azevêdo

E-mail: samuelsantos2509@hotmail.com

Curriculum lattes: <http://lattes.cnpq.br/5744834124561084>

Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Pernambuco do Centro Acadêmico do Agreste. Atualmente mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental do Centro Acadêmico do Agreste, Universidade Federal de Pernambuco e Superintendente de Infraestrutura da Prefeitura Municipal de Bezerros. Foi gerente executivo da SEINFRA, da Prefeitura Municipal de Bezerros, gerenciando equipes; acompanhando e fiscalizando a obra de implantação do SES do Município e reparos nas redes de abastecimento de água. Tem experiência em elaboração de Termos de Referência/Projetos Básicos; gestão e implantação de procedimentos, baseados na legislação vigente, com enfoque na reestruturação de uma secretaria de infraestrutura em situação crítica/calamitosa.