



Recebido: 30/03/2024 | Revisado: 18/05/2024 | Aceito: 18/05/2024 | Publicado: 29/05/2024



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 Unported License.

DOI: 10.31416/rsdv.v12i2.1033

## Fissuras em aterros sobre solos moles: abordagens, mecanismo e influências

*Cracks in embankments on soft soils: approaches, mechanism, and influences*

**NORBERTO, Alison de Souza. Doutorando em Engenharia Civil/Geotecnia**

Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) - Centro de Tecnologia e Geociência (CTG). Av. Acadêmico Helio, s/n - Centro de Tecnologia e Geociências, Cidade Universitária, 50740530 - Recife, PE - Brasil, Telefone: (81) 21268706, E-mail: alison.norberto@ufpe.br, orcid.org/0000-0002-4303-4847

**OLIVEIRA JUNIOR, Antônio Italcy de. Doutor em Engenharia Civil/Geotecnia**

Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) - Centro de Tecnologia e Geociência (CTG). Av. Acadêmico Helio, s/n - Centro de Tecnologia e Geociências, Cidade Universitária, 50740530 - Recife, PE - Brasil, Telefone: (81) 21268706, E-mail: antonio.italcy@ufpe.br, orcid.org/0000-0002-8297-5068

**BESERRA, Leila Brunet de Sá. Doutora em Engenharia Civil/Geotecnia**

Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) - Centro de Tecnologia e Geociência (CTG). Av. Acadêmico Helio, s/n - Centro de Tecnologia e Geociências, Cidade Universitária, 50740530 - Recife, PE - Brasil, Telefone: (81) 21268706, E-mail: leila.brunet@ufpe.br, orcid.org/0000-0002-5799-9105

**GUIMARÃES, Leonardo José do Nascimento. Doutor em Engenharia Civil/Geotecnia**

Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) - Centro de Tecnologia e Geociência (CTG). Av. Acadêmico Helio, s/n - Centro de Tecnologia e Geociências, Cidade Universitária, 50740530 - Recife, PE - Brasil, Telefone: (81) 21268706, E-mail: leonardo.guimaraes@ufpe.br, orcid.org/0000-0001-6803-6024

### RESUMO

Este trabalho aborda a ocorrência de fissuras em aterros construídos sobre solos moles, um fenômeno complexo com relevância significativa na engenharia geotécnica. A presença de tais fissuras pode comprometer a estabilidade e segurança das estruturas geotécnicas, acarretando consequências adversas as obras. O estudo teve como objetivo realizar uma revisão de literatura e comparar com um estudo de caso ocorrido em Pernambuco, visando compreender os processos e mecanismos associados à formação de fissuras de tração em aterros sobre solos moles. Foram consultadas diversas fontes de referência, totalizando aproximadamente 120 publicações, dentre estas, 47 artigos foram selecionados para as análises. As análises evidenciaram os principais mecanismos de formação de fissuras em solos moles, seu comportamento geomecânico e influência no fator de segurança (FS) da estabilidade de taludes. Dos resultados, foram verificados que a ocorrência de fissuras em aterros sobre solos moles é frequente em áreas de baixada litorânea no Brasil, como em cidades litorâneas dos estados de Pernambuco e Rio de Janeiro. Além disso, destacou-se a importância de considerar a possibilidade da formação de fissuras em aterros sobre solos moles na análise de estabilidade. Verificou-se ainda que parâmetros como altura do aterro, espessura da camada de solo mole e resistência dos solos são elementos cruciais para a compreensão do processo de formação de fissuras. A comparação com o caso estudado na presente pesquisa ressalta a relevância desses trabalhos para a engenharia geotécnica e a segurança das estruturas construídas sobre solos moles.

**Palavras-chave:** Tração, fator de segurança, resistência, estabilidade, comportamento geomecânico.

### ABSTRACT

This work addresses the occurrence of cracks in embankments built on soft soils, a complex phenomenon with significant relevance in geotechnical engineering. The presence of such cracks can



compromise the stability and safety of geotechnical structures, causing adverse consequences for the works. The study aimed to carry out a literature review and compare it with a case study that took place in Pernambuco, aiming to understand the processes and mechanisms associated with the formation of tensile cracks in embankments on soft soils. Several reference sources were consulted, totaling approximately 120 publications, of which 47 articles were selected for analysis. The analyzes highlighted the main mechanisms of crack formation in soft soils, their geomechanical behavior and influence on the safety factor (SF) of slope stability. From the results, it was verified that the occurrence of cracks in embankments on soft soils is frequent in low-lying coastal areas in Brazil, such as in coastal cities in the states of Pernambuco and Rio de Janeiro. Furthermore, the importance of considering the possibility of the formation of cracks in embankments on soft soils in the stability analysis was highlighted. It was also found that parameters such as embankment height, thickness of the soft soil layer and soil resistance are crucial elements for understanding the crack formation process. The comparison with the case studied in the present research highlights the relevance of these works for geotechnical engineering and the safety of structures built on soft soils.

keywords: Traction, safety factor, resistance, stability, geomechanical behavior.

## Introdução

Segundo Duncan et al. (2014), vários e diferentes processos podem levar à redução da resistência ao cisalhamento dos solos. Um desses processos é o surgimento de fissuras, que, ao se desenvolverem nas cristas de encostas, taludes ou aterros, podem ser seguidas por rupturas. Duncan et al. (2014) acrescentam ainda que essas fissuras se desenvolvem como resultado da tensão na superfície do solo, que excede a resistência à tração desse material. Essas fissuras só são possíveis em solos que possuam alguma resistência à tração, geralmente associada aos solos argilosos. Essas fissuras ocorrem apenas em solos que apresentam alguma resistência à tração, frequentemente observada em solos argilosos. Tais fissuras podem se manifestar de duas maneiras: nos solos argilosos compactados, que tendem a retrair-se durante o processo de secagem, resultando em trincas, e nos aterros construídos sobre argilas moles, os quais estão sujeitos a adensamentos primário e secundário (creep).

A secagem do solo é compreendida como um fenômeno hidromecânico (HM) fortemente acoplado. Ligados a esse fenômeno de secagem do solo estão vários fatores que regem o comportamento hidromecânico do solo, tais como as condições iniciais e de contorno, as propriedades e características do material (tamanho dos grãos, distribuição, mineralogia da argila e microestrutura), a geometria do solo, a retenção de água no solo e as interações químicas (MAEDO et al., 2020).

Este processo de secagem pode provocar o surgimento de fissuras no solo. Zeng et al. (2020) comentam que essas fissuras, formadas durante processos de secagem, também conhecidas como fissuras de dessecação, podem modificar consideravelmente o sistema hidrogeológico e as condições de fluxo, aumentando o desgaste dos grãos do solo e prejudicando sua capacidade de retenção de água. Isso resulta no agravamento da erosão do solo e na destruição da ecologia ambiental local onde esse solo está presente.

Neste contexto, estão as regiões sujeitas a variações sazonais, como as regiões de clima tropical, onde as condições climáticas afetam a quantidade de água presente nos solos, resultando na sua expansão e retração. Com as previsões de verões progressivamente mais quentes e secos, há perspectivas de aumento na frequência e extensão das fissuras de dessecação em solos, afetando, por sua vez, a infraestrutura civil e a agricultura inseridas nesse contexto regional.

Ferreira & Ferreira (2009) relatam o caso de Petrolândia, cidade localizada no semiárido pernambucano, que apresentou registros de solos com fissuras em algumas áreas, as quais causaram transtornos e prejuízos para os moradores locais.

Vale ressaltar que, além do mecanismo de fissuração do solo por dessecação, há outro mecanismo que pode desencadear o processo de abertura de fissuras nos solos, o qual ocorre durante o desenvolvimento das tensões ao longo de um talude ou aterro. Esse mecanismo foi abordado por Tschobotarioff (1973) em um estudo de caso sobre a análise de estabilidade da ruptura de um talude de argila em um porão de dois andares. Para o autor, as tensões de tração podem se desenvolver atrás da crista ou do topo de uma encosta ou talude de solos argilosos, o que pode resultar no surgimento de fissuras capazes de reduzir substancialmente a estabilidade do talude.



De acordo com Terzaghi (1943), a parte superior de uma cunha de ruptura de um talude ou encosta está sujeita a esforços de tração. Nesse caso, se o solo não suportar o esforço de tração, fissuras se formarão e o fator de segurança (FS) da superfície de ruptura será reduzido.

Em alguns casos de obras geotécnicas o aparecimento de fissuras de tração pode se apresentar quase que simultaneamente ao processo de ruptura, quando o cenário de deformação das camadas mais profundas ocorre de maneira acelerada. Em outros cenários esse processo pode ocorrer de forma mais lenta, onde o aparecimento de trincas e fissuras vai se expandindo ao longo do tempo, sendo este agravado por aspectos antrópicos e climáticos onde a estrutura geotécnica está inserida. Zhang et al. (2019) apresentaram o caso da ruptura do reservatório das Três Gargantas, o qual previamente a ruptura apresentou uma série de rachaduras e fissuras ao longo do talude, e verificaram que as fissuras combinadas com a chuva foram os principais agravantes combinados para a ocorrência da ruptura.

Nesse sentido, Chirapuntun e Duncan (1975) comentam que a fissuração de uma estrutura geotécnica pode provocar uma redução muito significativa do fator de segurança de um aterro sobre solos moles, pois a resistência ao cisalhamento da região fissurada é reduzida a zero ao longo da fissura. Essas fissuras podem se desenvolver devido aos processos de umedecimento e secagem ou devido às tensões de tração que se desenvolvem à medida que o aterro é executado.

Além disso, Sánchez et al. (2008) acrescentam que o surgimento de fissuras pode criar um caminho preferencial para o fluxo de água e o transporte de poluentes, afetando a resistência do solo e outras propriedades mecânicas, com impacto correspondente na estabilidade e desempenho de encostas, taludes, aterros, fundações, muros de contenção e outras geoestruturas, com seus riscos e custos associados.

Assim sendo, a formação e propagação de fissuras devido à tração relacionada ao estado de tensão do solo são fenômenos extremamente complexos, devido à forte interação entre os comportamentos hidráulico e mecânico dos solos. Os mecanismos físicos que descrevem o processo de formação e propagação de fissuras em massas de solo ainda não são totalmente compreendidos.

O presente estudo teve como objetivo a realização de uma revisão de literatura e um comparativo com um estudo de caso referente a um aterro construído sobre solos moles, localizado no estado de Pernambuco, que veio a romper durante sua construção. Após o ocorrido, o aterro exibiu extensas microfissuras de tração ao longo da superfície. Além disso, foram avaliados os processos, mecanismos, fenômenos e demais aspectos associados à formação de fissuras de tração em aterros construídos sobre solos moles.

## Material e métodos

### Levantamento de Dados

O presente estudo engloba uma pesquisa bibliográfica que, de forma abrangente, avalia os principais trabalhos acerca do surgimento de trincas e fissuras em aterros construídos sobre solos. Além de comparar e apresentar um caso de ocorrência do aparecimento de fissuras ocorrido no estado de Pernambuco.

É prática corrente a realização de uma análise bibliométrica visando discernir as publicações de maior relevância, proporcionando uma maior solidez aos resultados, sem restrição quanto às fontes de referência.

Foram então consultados diversos meios de divulgação científica, abrangendo portais de publicações acadêmicas, periódicos especializados, anais de congressos, a biblioteca virtual de associações científicas e a Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD), referentes ao período entre 1950 e 2023. Foram compiladas aproximadamente 120 publicações, sendo criteriosamente selecionados 47 artigos, a seleção destes foi balizada no enfoque de casos de ocorrências de rupturas ou ocorrências em aterros sobre solos moles. Os artigos selecionados para as análises foram organizados por ano de publicação. Em seguida, procedeu-se a uma análise sistemática das pesquisas encontradas.

Estes estudos, tipicamente conduzidos com análises direcionadas a aterros executados sobre solos moles, adotaram diversas metodologias para a compreensão dos aspectos deformacionais, identificação dos fatores influentes no surgimento de fissuras, bem como para a formulação de métodos de previsão e cálculo destas últimas.

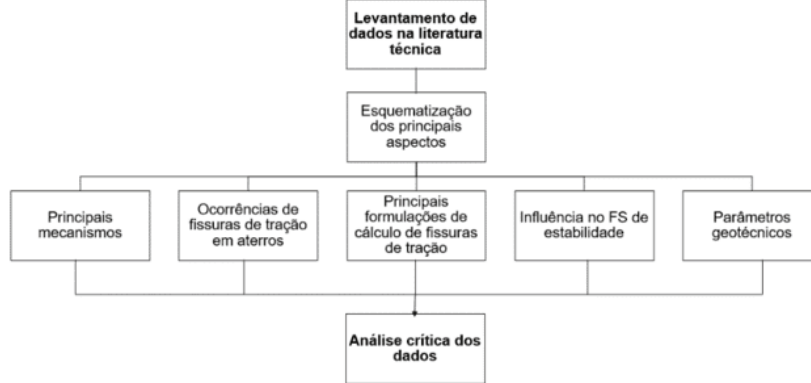
### Esquematização dos dados



Os dados coletados foram então esquematizados e analisados em tópicos principais conforme apresentado na

Figura 1 a seguir.

Figura 1- Esquematização da metodologia de análise da pesquisa.

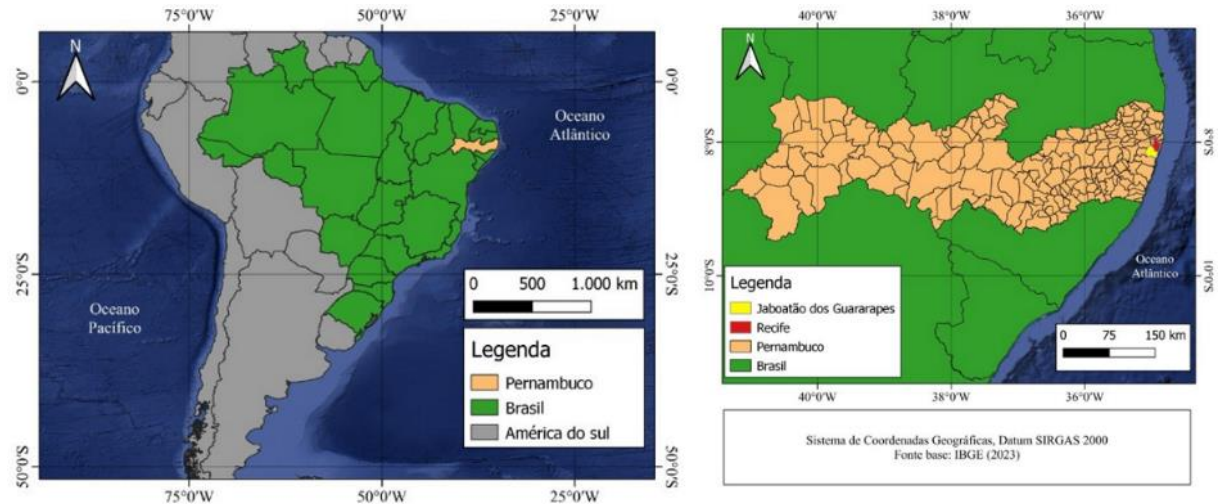


Fonte: (Autores, 2024).

### Área de Estudo

A área de estudo utilizada para comparativo nas análises com os dados coletados na literatura foi um aterro construído nas proximidades da Rodovia BR-101 Sul, no quilômetro 79,5, Muribeca, Jaboatão dos Guararapes - PE. Este aterro foi projetado com o propósito de servir como uma via de acesso para uma adutora, na Figura 2 é apresentada a localização da área de estudo. Esse aterro no decorrer do seu processo construtivo apresentou fissuras ao longo da sua superfície, conforme imagens de satélite observadas no Google Earth (2024).

Figura 2- Área de estudo com ocorrência do aparecimento de fissuras em um aterro construído sobre solos moles.



Fonte: (Autores, 2024).

A construção do aterro teve início em 2018, e o projeto geométrico previa uma altura final de 6,5 metros e uma largura do topo de 24,0 m. Além disso, o projeto incluía duas bermas de equilíbrio, cada uma com 2,5 m de altura e uma largura de 28,0 m. Adicionalmente, foi projetado o uso de um colchão de pedra com 1,0 m de espessura em toda a base do aterro.

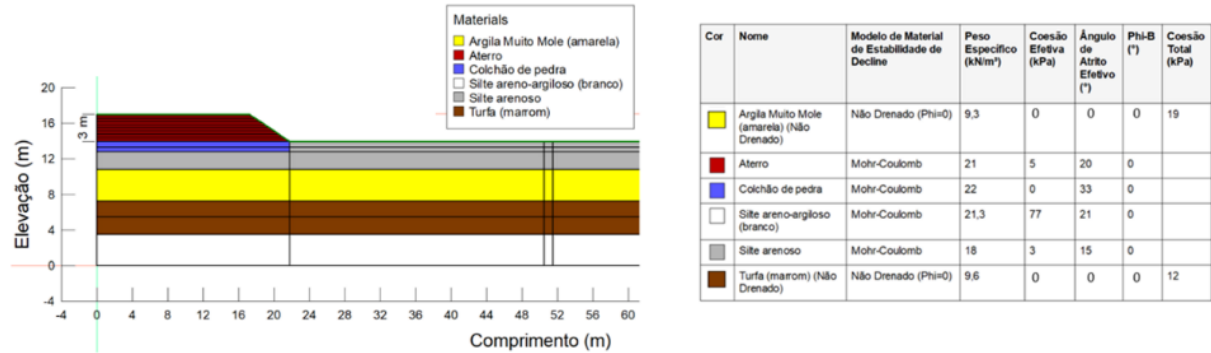
A implantação do aterro teve início no ano de 2018, marcada pelo início das obras de terraplanagem, supressão vegetal e limpeza da área destinada ao projeto. Entretanto, um acontecimento crítico ocorreu em 2020, quando uma ruptura no aterro foi registrada, conforme observadas nas imagens de satélite disponíveis no Google Earth (2024). Além disso, toda a área do aterro construído sobre solos moles apresentou longos trechos de fissuras. Nessa época, a estrutura



possuía uma altura de 3,0 metros, seguindo uma geometria de 3H:2V, mas ainda não havia passado pela execução das bermas de equilíbrio projetadas.

Na **Figura 3** a seguir é apresentado um perfil geológico geotécnico e os parâmetros geotécnicos do aterro que foram utilizados nas análises comparativas. Destaca-se que o aterro foi executado sobre uma camada de cerca de 9 metros de solo mole.

**Figura 3-** Perfil geológico-geotécnico e parâmetros do aterro.



Fonte: (Autores, 2024).

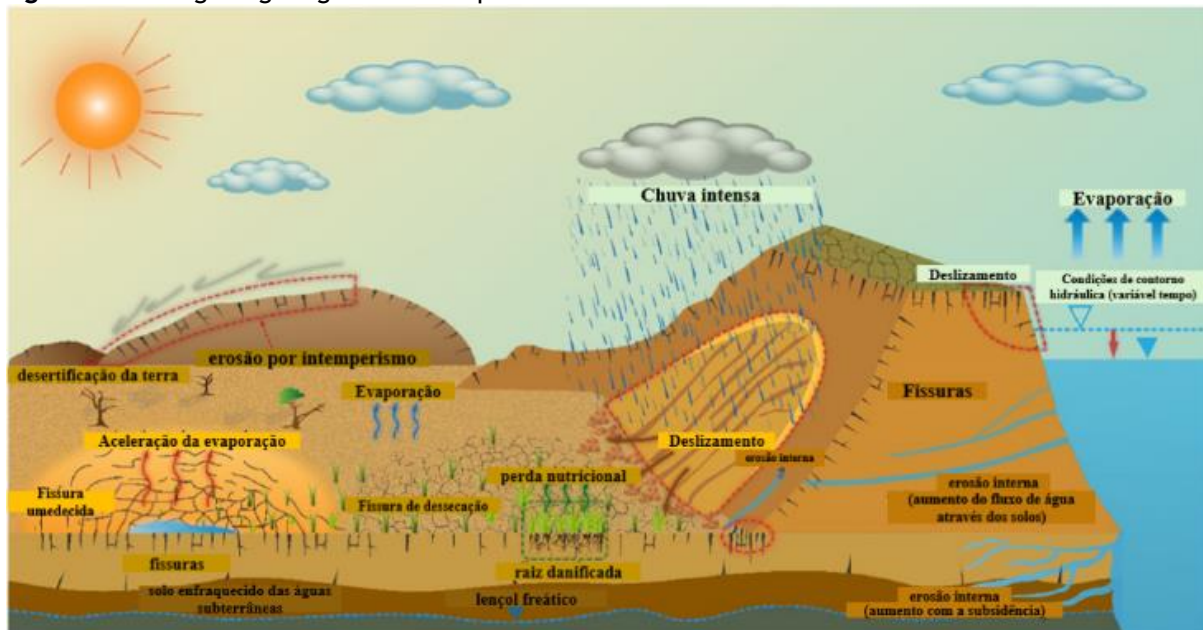
## Resultados e discussão

### Principais mecanismos

As fissuras em solos são aberturas significativas que ocorrem devido a diferentes mecanismos. Diversos fatores podem desencadear esse processo, os principais mecanismos são a variação de umidade, a aplicação de cargas ou tensões excessivas, o congelamento e o degelo, a expansão e contração do solo, e a ação de raízes de plantas. Esses fatores podem gerar tensões excessivas no solo, levando à abertura de fissuras. Tang et al. (2021) apontam que todo o contexto climático e as condicionantes locais em geral são responsáveis pelo processo de abertura de fissuras no solo, tais mecanismos podem ser exemplificados no cenário ilustrado na

**Figura 4**, onde é possível observar os diversos mecanismos que atuam durante o processo de abertura de fissuras, com destaque para o desencadeamento de escorregamentos de terra associados às aberturas de fissuras e o progressivo efeito climático sobre a área.

**Figura 4-** Perfil geológico-geotécnico e parâmetros do aterro.

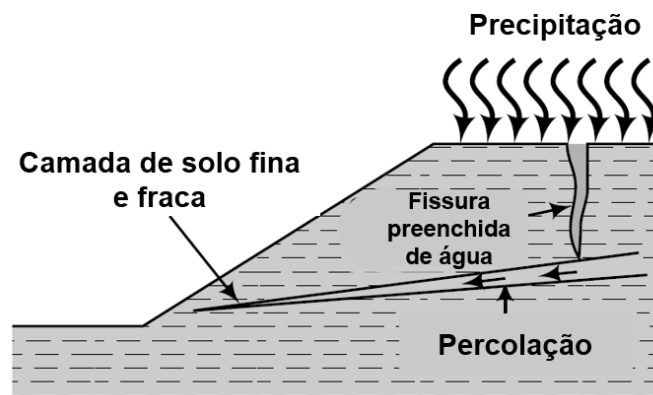


Fonte: Adaptado de Tang et al. (2021).

O processo de formação de fissuras em solos é um fenômeno complexo que tem sido extensivamente estudado na literatura técnica ao longo dos anos: Rodríguez et al. (2007), Fredlund et al. (2010), Guimarães et al. (2013), Sanchez et al. (2014), Wang et al. (2017), Tang et al. (2018), Prakash et al. (2019), Zeng et al. (2019), Araújo (2020), Zhu et al. (2020) e Tang et al. (2021).

Essa presença de fissuras no solo tem um impacto significativo no seu comportamento geomecânico, podendo afetar a estabilidade de taludes, a permeabilidade, a capacidade de suporte e a deformabilidade do solo (Tang et al., 2007; Tang et al., 2018). Essa ocorrência de fissuras pode também aumentar a infiltração de água, resultando em uma maior suscetibilidade à erosão e ao transporte de sedimentos (Wei et al., 2020; Zhu et al., 2018; Budhu 2015), conforme **Figura 5**. Além disso, as fissuras podem comprometer a capacidade de suporte do solo, levando a problemas como recalques diferenciais e instabilidade de estruturas construídas sobre ele (Li et al., 2020; Stirling et al., 2020; Zhang et al., 2020).

**Figura 5-** A chuva preenche a fissura e introduz a percolação na camada de solo fino e baixa resistência.



Fonte: Adaptado de Budhu (2015).

Existem diversas formas de estudar o comportamento das fissuras em solos. Uma abordagem comum é realizar observações em campo, tais quais os estudos realizados por Araújo (2020), para analisar a morfologia, distribuição e propagação das fissuras associadas as condicionantes locais. Além disso, ensaios de laboratório, como os ensaios de tração e de dessecação de solos, podem ser realizados para avaliar a resistência do solo às fissuras. A modelagem numérica também desempenha um papel importante no estudo das fissuras em solos, permitindo simular o comportamento do solo em diferentes cenários e prever o desenvolvimento e a propagação das fissuras, tais quais os estudos desenvolvidos por: Aoki et al. (2007); Horgan & Young (2000) e Musielak & Sliwa (2015).

Um dos pontos que influencia na formação de fissuras no solo é a sua composição mineralógica. Paiva (2016) destaca que solos com alto teor de minerais expansivos, como argilas montmoriloníticas, são mais propensos a apresentar abertura de fissuras devido à sua capacidade de expansão e contração em resposta a variações de umidade. Além disso, a presença de minerais como micas e feldspatos também pode influenciar a suscetibilidade do solo à formação de fissuras.

Outro aspecto importante é a influência das condições climáticas no desenvolvimento de fissuras em solos. Mudanças sazonais, variações de temperatura, ciclos de secagem e umidade, e eventos extremos como chuvas intensas podem desempenhar um papel significativo na formação e na abertura de fissuras em solos (Liu et al., 2020). Esses fatores climáticos podem levar a variações na umidade do solo e, conseqüentemente, a tensões que desencadeiam o processo de fissuração.

Amin et al. (2019) comenta da importância do monitoramento contínuo das fissuras em obras geotécnicas. O monitoramento recomendado em geral é por meio de inclinômetros, extensômetros de haste, marcos superficiais e sensores de deformação, os quais permitem acompanhar as mudanças nas fissuras ao longo do tempo, avaliar o seu desenvolvimento e compreender melhor o comportamento do solo em relação às fissuras. O monitoramento geotécnico, em geral, avalia a magnitude das deformações, bem como a taxa/velocidade das deformações. Esse processo contínuo é fundamental para o gerenciamento de riscos em projetos de engenharia e para a implementação de medidas mitigadoras adequadas em área suscetíveis a geração e propagação das macrofissuras.

Uma das consequências do aparecimento de fissuras ou microfissuras é a geração de um efeito de tração no solo. Essa tração pode resultar em movimentos diferenciais do solo, deformações e até rupturas.

Os solos moles, caracterizados por sua baixa resistência e alta compressibilidade, apresentam-se como um substrato desafiador para a construção de estruturas de grande porte. A sobrecarga imposta pelos aterros sobre esses solos pode resultar em recalques diferenciais e deformações excessivas, levando à formação de fissuras. Esses fenômenos comprometem a integridade estrutural e a segurança das edificações, demandando intervenções corretivas dispendiosas e, em muitos casos, impactando a funcionalidade das estruturas.

### Ocorrência de fissuras de tração em aterros

A partir da análise dos dados reportados na literatura e listados da Tabela 1, pode-se observar uma ocorrência frequente de fissuras em aterros sobre solos moles nas zonas de baixadas litorâneas no Brasil, principalmente em cidades localizadas no litoral de Pernambuco e Rio de Janeiro.

Nesse sentido Almeida e Marques (2014) comentam sobre as construções de aterros sobre solos moles em zonas de baixadas do litoral brasileiro, indicando uma prática frequente, motivada pela necessidade de expansão urbana e pela escassez de áreas disponíveis em terrenos mais elevados. No entanto, essa prática tem sido marcada pelo recorrente aparecimento de fissuras nesses aterros, o que constitui um desafio significativo para a engenharia geotécnica.

As ocorrências do aparecimento de fissuras em obras geotécnicas associadas a tração nas camadas mais superficiais de solo são reportadas na literatura geralmente associada a rupturas de aterros ou deslizamento de encostas. Souza Neto et al. (2022) apresentou o caso da ruptura de um aterro sobre solos moles ocorrido em fevereiro de 2008 na cidade de Goiana-PE, que após a ruptura foi possível observar ao longo da área do aterro trechos com a presença de fissuras de tração, provenientes do processo deformacional da área, conforme é possível observa na **Figura 6** a seguir.

**Figura 6-** Fissuras de tração abertas após ruptura de um aterro sobre solos moles.



Fonte: Adaptado de Souza Neto et al. (2022).

No caso apresentado por Souza Neto et al. (2022), o aparecimento das fissuras foi decorrente a alta compressibilidade da camada de argila mole existente na fundação do aterro, que provocou aumento acelerado dos deslocamentos verticais, que por consequência acentuou o processo de tração nas camadas mais superficiais do aterro, levando o aparecimento de trincas de tração e posteriormente ao processo de ruptura.

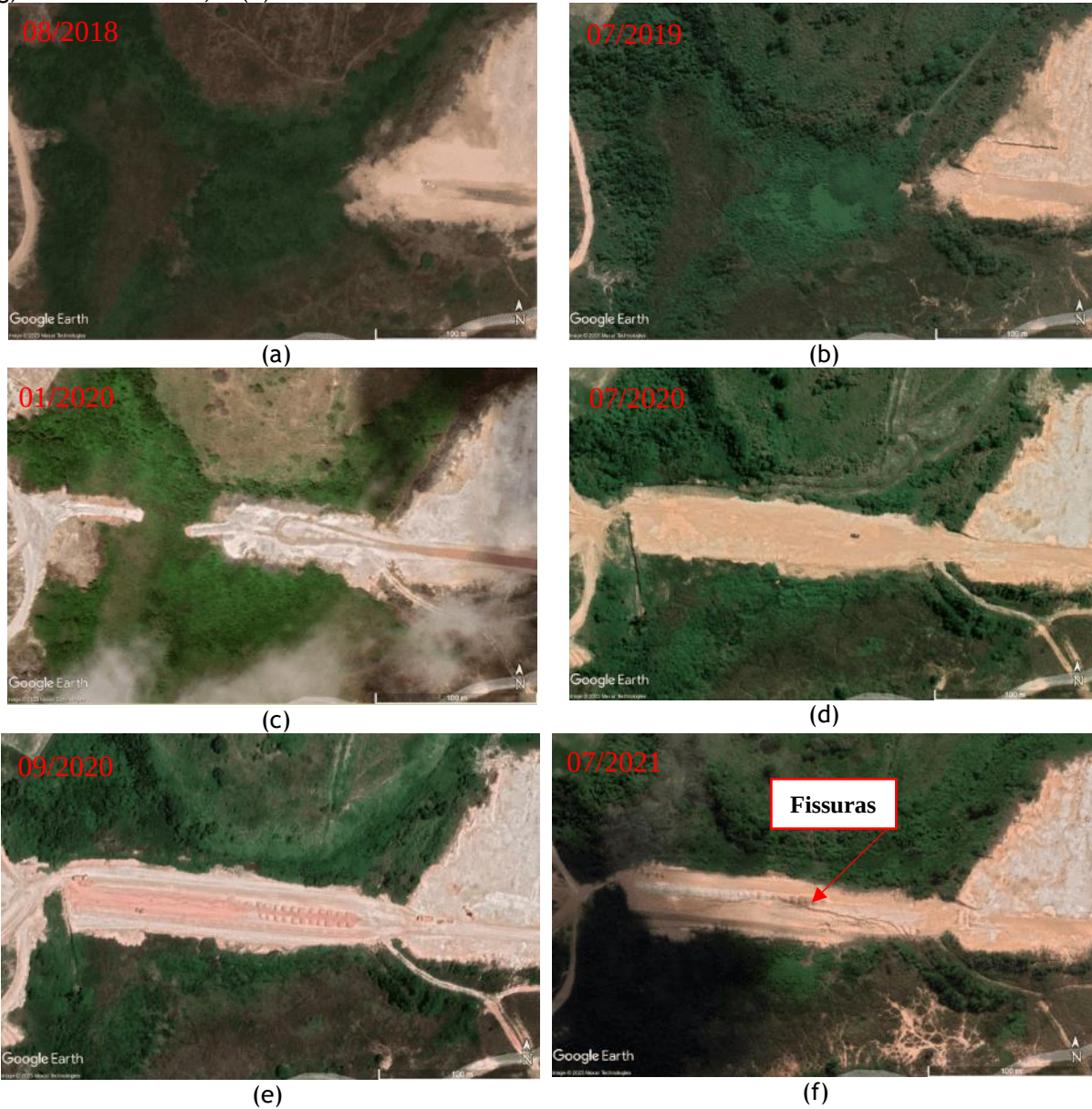
Ainda nesse sentido, Bello (2004) apresentou o caso da ruptura de um aterro sobre solos moles localizado na BR-101 em Recife-PE, o qual apresentou ao longo do terreno trincas de tração. Bello (2004) discorre que o fissuramento de um aterro pode reduzir o fator de segurança de aterros sobre solos moles, pois a resistência ao cisalhamento é reduzida ao longo da área fissurada. Essas fissuras podem decorrer devido a secagem do solo ou pelas altas tensões de tração nas camadas superficiais do aterro, provocadas pelos recalques diferenciais e deslocamentos horizontais superficiais da fundação.

De forma comparativa aos dados de ocorrências de fissuras em aterros sobre solos moles, é apresentado na **Figura 7** um conjunto de imagens de satélite que acompanham o progresso da



construção do aterro da área de estudo da presente pesquisa. Onde nessa imagem são apresentadas o progresso da construção do aterro desde o início das intervenções em 2018 até após a ocorrência do aparecimento de fissuras no solo no ano de 2021. Especialmente nas imagens do ano de 2021, é notável a presença de macrofissuras que se desenvolveram ao longo do eixo longitudinal da estrutura.

**Figura 7-** Imagens de satélite do histórico da área do aterro ao longo dos anos: (a) agosto de 2018; (b) julho de 2019; (c) janeiro de 2020; (d) julho de 2020; (e) setembro de 2020; (f) agosto de 2021; (g) outubro de 2021; e (h) dezembro de 2021.







(g)



(h)

Fonte: Adaptado de Google Earth (2024).

### Principais formulações de cálculo de fissuras

Conforme o levantamento de dados na literatura técnica, existem algumas formulações aplicadas aos estudos de fissuras em aterros sobre solos moles. Nesse sentido Chirapuntun e Duncan (1975) equacionaram uma altura limite do aterro (Ht) para execução de um aterro sobre solos moles sem o aparecimento de fissuras, essa relação é apresentada na (Equação 1e Figura 8 a seguir.

$$Ht = 5.1 \frac{S_{us}}{\gamma_E} * \left(\frac{K_F}{K_E}\right)^{0.75} * \left(\frac{W}{D}\right)^{0.25} \tag{Equação 1}$$

onde:

Ht: altura máxima do aterro para o surgimento de fissuras;

S<sub>us</sub>: resistência não drenada do material de fundação;

γ<sub>E</sub>: peso específico do aterro;

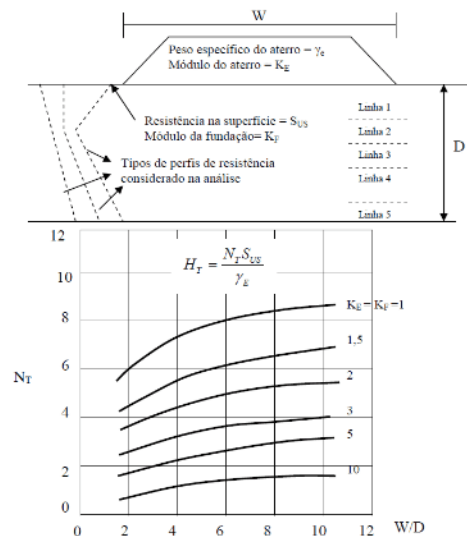
K<sub>F</sub>: módulo de deformação do material de fundação;

K<sub>E</sub>: módulo de deformação do aterro;

W :largura do aterro;

D: espessura do material de fundação.

Figura 8- Variação dos parâmetros no decorrer do desenvolvimento de tensões no aterro em relação dos parâmetros.



Fonte: Adaptado de Chirapuntun e Duncan (1975).

Chirapuntun e Duncan (1975) também equacionaram uma relação para quantificar a



profundidade das fissuras de tração que são desenvolvidas neste processo, essa formulação é apresentada na (Equação 2).

$$H_f = 4 \frac{c}{\gamma_E * FS} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

$H_f$ : altura da fissura de tração;

$c$ : coesão do aterro;

$\gamma_E$ : peso específico do aterro;

$FS$ : fator de segurança da análise;

Dunca et al. (2014) também apresentaram uma proposta para o cálculo de profundidade de fissura de tração de um aterro coesivo construído sobre solos moles. Segundo os autores essa introdução da fissura de tração tem também o benefício de eliminar instabilidades numéricas em análises de estabilidade, decorrentes de tensões negativas de tração. A profundidade até onde se desenvolve a fissura  $z_{fiss}$  é aquela na qual a tensão horizontal é nula, sendo calculada pela (Equação 3):

$$z_{fiss} = 2 \frac{c}{\gamma_E * kaat^{\frac{1}{2}}} \quad (\text{Equação 3})$$

onde:

$z_{fiss}$ : altura da fissura de tração;

$c$ : coesão do aterro;

$Kaat$ :  $\text{tg}^2(45 - \phi_d/2)$  - coeficiente de empuxo ativo do aterro;

$\phi_d$ : ângulo de atrito mobilizado no aterro;

$\gamma_E$ : peso específico do aterro;

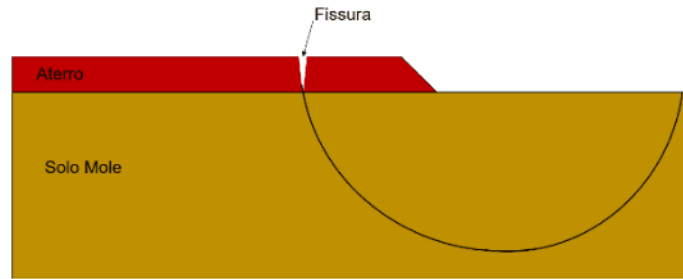
Além disso, Almeida e Marques (2014) discutem que no caso de solo de aterro com poucos finos, é usual a consideração de aterro saturado com comportamento drenado, com  $c = 0$  e  $\phi \neq 0$ . Entretanto, no caso de coesão elevada e ângulo de atrito baixo, cria-se uma tração no solo que não é resistida pelo aterro. Nesse caso, deve-se considerar o aterro fissurado em seu trecho superior.

## Influência no FS de estabilidade

Dos dados coletados na literatura e apresentados na **Tabela 1**, em sua maioria destaca-se a relação e a influência da presença de fissuras e o impacto importante da condição de estabilidade dos aterros. Essa relação entre fissuras de tração em aterros sobre solos moles e FS de estabilidade são cada vez mais adicionadas aos processos de análises.

E nesse sentido, Chirapuntun e Duncan (1975) indicam que o recalque diferencial entre o pé e o centro do aterro, sobre solos moles, pode provocar a flexão do aterro e, por consequência, a geração de tensões de tração no mesmo. As tensões de tração também emergem nas proximidades do centro do aterro devido à mobilização do solo da fundação. Posteriormente, tais tensões podem gerar trincas e fissuras. Caso uma fissura se desenvolva no interior de um aterro, não se pode contar com a resistência deste nas análises de estabilidade. Isso ocorre porque a superfície de deslizamento poderia passar por essa fissura com praticamente nenhuma resistência ao longo de seu comprimento, isso pode ser observado na **Figura 9**.

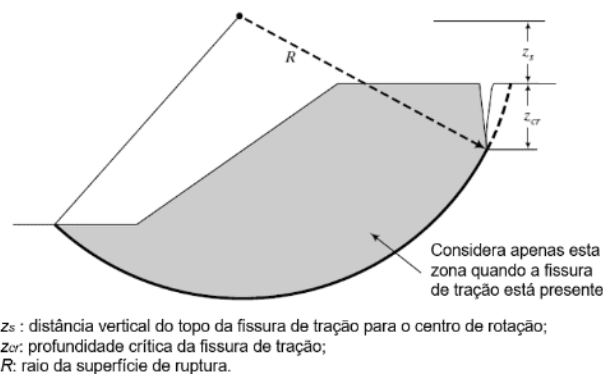
**Figura 9-** Superfície de ruptura passando pelo trecho fissurado.



Fonte: Adaptado de Chirapuntun e Duncan (1975).

Budhu (2015) acrescenta que as fissuras de tração em solos finos tendem a desenvolver-se na crista e na face das encostas. Para esse cenário a superfície de ruptura não intercepta a superfície do solo, mas sim a base da fissura de tração (Figura 10).

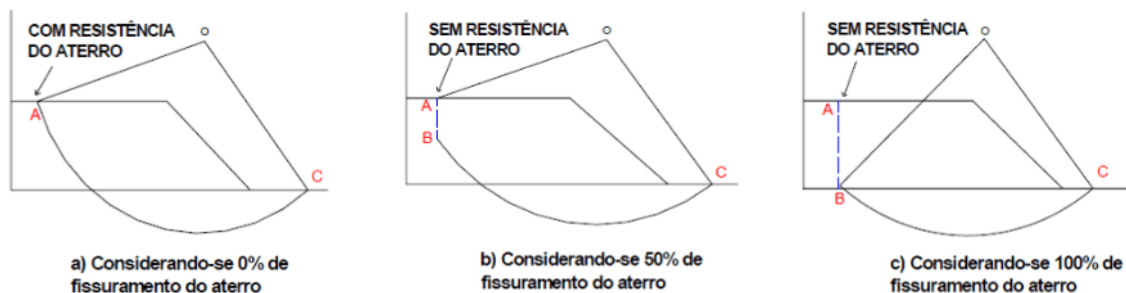
Figura 10- Superfície de ruptura passando pelo trecho fissurado.



Fonte: Adaptado de Budhu (2015).

Bello (2004) realizou a retroanálise utilizando softwares que incorporavam a metodologia desenvolvida por Chirapuntun e Duncan (1975), para contabilizar o efeito do aparecimento de fissuras na resistência ao cisalhamento do material e conseqüentemente ao FS da estabilidade do conjunto: aterro + fundação. A autora simulou três diferentes cenários de cálculo de FS nas análises de estabilidade, conforme apresentado na Figura 11 a seguir.

Figura 11- Superfície de ruptura passando pelo trecho fissurado.



Fonte: Adaptado de Bello (2004).

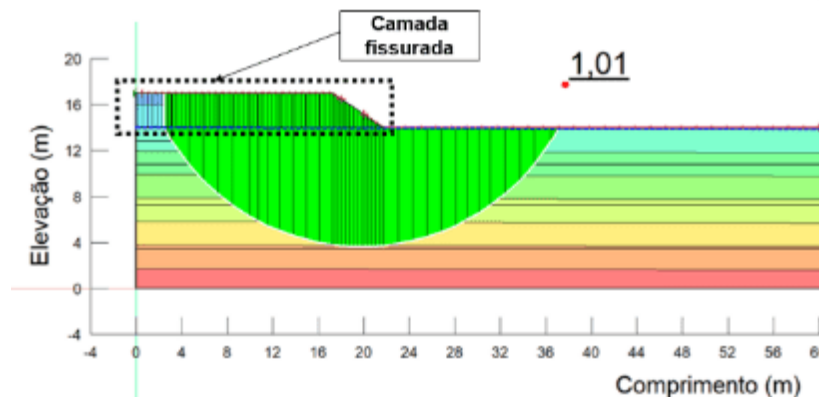
Chirapuntun & Duncan (1975) destacam que a introdução de fissuras de tração no cálculo do FS de aterros de solos coesivos deve ser limitada, a qual deve ser inserida a uma profundidade máxima possível de fissuração e que não deve ser ultrapassada. Se a profundidade de fissura atribuída for menor que essa máxima possível, o fator de segurança diminuirá devido à fissura de tração. Contudo, se a profundidade atribuída for maior que essa máxima possível (ainda que hipoteticamente), o fator de segurança aumentará. Isso ocorre porque uma fissura excessivamente profunda reduz o momento de tombamento mais do que o momento resistente, levando ao aumento do fator de segurança.

Aplicando os conceitos apresentados anteriormente para o cálculo do FS de estabilidade de aterros sobre solos moles com presença de fissuras para o aterro da área de estudo da presente



pesquisa, de maneira a realizar uma retroanálise onde o FS do aterro é igual a 1. Foi então conduzida a retroanálise do aterro em um cenário com fissura de tração no aterro, de modo inserir o efeito dessa camada fissurada na estabilidade durante a ruptura, tendo em vista que foram observadas fissuras de tração ao longo da área do aterro pós ruptura (Figura 6). A seguir, na Figura 12, é apresentado o resultado da análise do FS com a presença de fissuras calculado pelo Método do Equilíbrio (MEL).

Figura 12- Retroanálise da ruptura considerando o aterro totalmente fissurado.



Fonte: Autores (2024).

Os resultados da aplicação do cálculo do FS com a presença da camada de aterro fissurado para a área de estudo se mostraram aderente, tendo em vista que atingiu o FS bem próximo de 1, resultado esperado em simulações de retroanálise de estabilidade.

### Parâmetros geotécnicos

Na Tabela 1 a seguir, são apresentados os parâmetros geotécnicos dos aterros construídos sobre solos moles, juntamente com informações relativas à camada de solo mole presente na fundação, a ocorrência de fissuras, rupturas e o fator de segurança mínimo calculado. Estes dados foram extraídos da literatura referente ao período compreendido entre os anos de 1955 e 2023.

Tabela 1 - Compilado de dados de aterros sobre solos moles e aspectos sobre o aparecimento de fissuras.

Ano	Local	Aterro				Fundação		Fissuras antes da ruptura	FS mínimo	Referência
		Altura (m)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	c (kPa)	$\phi$ (°)	IP (%)	espessura da camada (cm)			
1955	Scrapagate Great Salt Lake	4,3	17	48	0	82	91 - 15	Não	1.30	Golder & Palmer (1955)
1960	Lake New	12,8	20 - 24	0	40	42	-	Não	1,08	Casagrande (1960) Lo & Stermac (1965)
1965	Liskeard Launceston,	5,8	20	0	35	32	213 - 305	Não	0.97	Parry & McLeod (1967)
1967	Tasmanis	2,1	20	-	-	108	152	Não	1.65	Eide (1968)
1968	Bangkok A	1,7	20	-	-	70	91	sim	1.60	Eide (1968)
1968	Bangkok B	2,7	20	-	-	70	91	sim	1.50	Eide (1968)
1968	Bangkok C	1,3	20	-	-	70	91	não	2.0	Eide (1968)
1969	Maine	3,7	18 - 20	0	40	30	305	não	1,21	Ladd et al. (1969)
1972	Mataagami	3,6	19 - 22	0	35	47	305 - 457	não	1.57	Dascal et al. (1972)
1972	Bangkok E	2,2	20	-	-	90	< 107	sim	1.46	Eide & Holmberg (1972)
1972	Bangkok E	2,5	20	-	-	90	< 107	sim	1.61	Eide & Holmberg (1972)
1972	Bangkok F	2,4	20	-	-	80-	< 107	sim	1.33	Eide & Holmberg



Ano	Local	Aterro				Fundação		Fissuras antes da ruptura	FS mínimo	Referência
		Altura (m)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	c (kPa)	$\phi$ (°)	IP (%)	espessura da camada (cm)			
1972	Fair Haven, Vermont Portsmouth, New	13,7	22	0	35	16	90 457 - 610	não	0.97	(1972) Haupt & Olson (1972)
1972	Hampshire	6,6	17 - 18	0	40	18	30- 213 - 274	não	0.88	Ladd (1972)
1972	Pornic	4,0	20	10	40	45	198	não	1.17	Pilot (1972)
1972	Narbonn	9,6	20	52	26	6	305	não	0.99	Pilot (1972)
1972	Sr. André	3,4	20	-	-	47	107	não	1.38	Pilot (1972)
1972	Lanester So. Of	3,7	19	29	31	75	122	sim	1.35	Pilot (1972)
1972	France	6,1	17	-	35	35	305	não	1.30	Pilot (1972)
1972	King's Lynn	10,1	17	-	-	35	76	não	1.02	Wilkes (1972)
1980	Sarapui-RJ	2,8	20	8	35	75	1100	Sim	0,955	Ortigão (1980)
1985	Sarapui-RJ	2,5	20	10	35	75	1100	Sim	0,99	Almeida (1985)
1999	Linha Verde, na Bahia e Sergipe	3,8	20	0-29	41	-	28- 550	sim	-	Palmeira et al. (199)
2003	Ponte Sobre o Rio dos Peixes - BR 381	4,5	18	10	30	15	7 - 800	sim	0,97	Perboni (2003)
2004	Recife-PE Lote 28 da BR 101	6	18	10	30	19	17 - 1400	sim	1,04	Bello (2004)
2011	BR 101	4,65	20	12	35	21	19 - 1600	não	1,31	Cerutti (2011)
2012	Goiana-PE	4,6	18	10	30	35	19 - 1500	não	0,765	Machado (2012)
2012	Goiana-PE	5	18	10	30	35	1500	não	1,5	Machado (2012)
2015	Tubarão-SC Barra da	3,5	20	0	33	-	20- 4200	Não	1,52	Teixeira (2015)
2016	Tijuca - RJ Não	6,4	19,5	10	20	100	1000	não	1,86	Cobe (2017)
2017	informado Não	3	20	5	35	-	2000	Não	0,71	Massocco (2017)
2017	informado	3	20	5	35	-	2000	Não	1,38	Massocco (2017)
2017	Sarapui-RJ São	3,1	20	10	35	75	1100	Sim	1	Pinto (2017)
2017	Gonçalo- RJ	2	20	10	25	96	400	sim	-	Souza (2017)
2018	Goiana (aterro 1) - PE		20	10	30	-	400	não	-	Souza (2018)
2018	Goiana (aterro 2) - PE	3	20	10	30	-	1400	não	-	Souza (2018)
2018	Goiana (aterro 3) - PE	4,7	20	10	30	19 - 33	1400	não	1,05	Souza (2018)
2018	Goiana (aterro 4) - PE	2	20	10	30	24 - 27	1450	não	-	Souza (2018)
2018	Goiana (aterro 5) - PE	3,9	20	10	30	25 - 30	1200	sim	1,36	Souza (2018)
2019	Recife-PE Bacabeira -	2,5	20	-	-	34	2300	não	-	Freitas (2019)
2019	MA Baixa	8,1	20	0	35	-	1100	não	-	Da Silva et al. (2019)
2020	Fluminense-	2,5	-	-	-	-	1100	sim	1,05	De Brito Tabajara et al. (2020)



Ano	Local	Aterro				Fundação		Fissuras antes da ruptura	FS mínimo	Referência
		Altura (m)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	c (kPa)	$\phi$ (°)	IP (%)	espessura da camada (cm)			
2020	RJ Parque Eólico-CE Porto	2,4	19,5	0	36	-	370	não	1,32	De Mattos Batista et al. (2020)
2021	Santana-AP	2	19	10	35	25,5	3000	não	0,96	Silva (2021)
2022	Goiana-PE	4	20	-	-	30	1400	sim	-	Neto et al. (2022)
2023	Muribeca-PE	3	21	5	20	28	930	sim	1,01	Autores (2023)
2023	BR-470-SC	3	20	5	35	-	2200	não	2,27	Ziesmann (2023).

$\gamma$ : peso específico; c: coesão;  $\phi$ : ângulo de atrito; IP: Índice de Plasticidade; e FS: Fator de Segurança.

Fonte: (Autores, 2024).

Quanto as análises dos parâmetros de aterros sobre solos moles e da relação com o processo de aparecimento de fissuras apresentados na **Tabela 1**.

Partindo para uma análise de cada um dos dados, foi então elaborado na **Tabela 2** um resumo das informações coletadas, destacando os principais parâmetros, sua influência no processo de aparecimento de fissuras e a faixa de variação verificada nos dados coletados.

**Tabela 2** - Resumo dos dados coletados e principais aspectos de aterros sobre solos moles e aspectos sobre o aparecimento de fissuras.

Parâmetro	Influência no processo de aparecimento de fissuras	Faixa de variação verificada
Altura (H) do aterro	A altura do aterro influencia diretamente a magnitude das cargas aplicadas sobre o solo de fundação. Aumentos significativos na altura podem resultar em um aumento substancial da pressão vertical na fundação. Isso pode levar a deformações e recalques diferenciais, criando tensões adicionais que podem contribuir para o surgimento de fissuras.	1,3 a 13,7 metros.
Peso específico ( $\gamma$ ) do aterro	O peso específico do aterro afeta a magnitude das forças atuantes nos aterros. Solos mais densos (com maior peso específico) podem suportar cargas maiores antes de atingirem a capacidade máxima de carga. Em contrapartida, solos mais leves (com menor peso específico) são mais susceptíveis a deformações e rupturas.	17 a 22 kN/m <sup>3</sup>
Coesão (c) do aterro	A coesão está diretamente relacionada à resistência ao cisalhamento do solo. Solos com coesão maiores têm uma maior capacidade de resistir a forças de cisalhamento. Portanto, a presença de um solo com baixo intercepto coesivo pode facilitar a formação de fissuras, especialmente sob cargas de tração elevadas.	0 kPa a 52 kPa
Ângulo de atrito( $\phi$ ) do aterro	O ângulo de atrito é um parâmetro que reflete a capacidade de um solo de resistir a esforços de compressão e cisalhamento. Solos com ângulos de atrito maiores tendem a ser mais resistentes e menos propensos a deformações plásticas. Solos com menor ângulo de atrito podem sofrer maiores deslocamentos e deformações, o que pode contribuir para a formação de fissuras.	20° a 52°
Índice de Plasticidade (IP) da fundação	O índice de plasticidade indica a quantidade de finos no solo, que têm a capacidade de reter água e deformar-se sob pressão. Solos com alto IP são mais susceptíveis a deformações plásticas e expansões. Essa propensão à deformação pode aumentar as chances de fissuração, especialmente se houver variações nas	6% a 108%



Parâmetro	Influência no processo de aparecimento de fissuras	Faixa de variação verificada
	condições de umidade.	
Espessura da camada de argila mole (D) da fundação	A espessura da camada influencia a distribuição de cargas no solo de fundação. Camadas mais espessas de solos moles podem contribuir para maiores deformações no aterro e consequentemente maiores chance de gerações de cargas de tração superficial no corpo do aterro, que podem gerar trincas e fissuras.	1 a 30 metros

Fonte: Autores (2024).

Observa-se que esses dados fornecem uma visão abrangente da heterogeneidade geotécnica dos locais estudados.

Dos 47 trabalhos com estudos referentes a aterros sobre solos moles, 17 indicaram o aparecimento de fissuras nesses aterros, destacando assim a importância técnica do estudo do aparecimento de fissuras em aterros executados sobre solos moles.

## Conclusões

Este estudo abordou a formação de fissuras em aterros construídos sobre solos moles, um fenômeno complexo de relevância significativa na engenharia geotécnica. A presença de fissuras pode comprometer a estabilidade e segurança de estruturas geotécnicas, impactando a eficiência das obras. Parâmetros como altura do aterro, espessura da camada de solo mole e parâmetros de resistência dos solos são cruciais para compreender o processo de formação de fissuras. A comparação com o caso de Pernambuco ressalta a relevância desses estudos para a engenharia geotécnica e a segurança das estruturas construídas sobre solos moles.

Nos dados da literatura, foram observadas variações nas características dos solos e nas condições de construção, destacando a necessidade de abordagens geotécnicas adaptadas a cada contexto regional. Além disso, a presença de fissuras antes da ruptura em alguns casos indica a importância do monitoramento e das intervenções preventivas durante a construção e operação dos aterros.

A heterogeneidade geotécnica observada nos locais estudados ressalta a complexidade do fenômeno. Entre os 47 estudos analisados, 17 destacaram o aparecimento de fissuras em aterros sobre solos moles, enfatizando a importância da pesquisa sobre esse tema na engenharia geotécnica. Essa diversidade nas condições geotécnicas dos locais analisados evidencia a necessidade de desenvolver abordagens específicas para cada caso, a fim de prevenir e mitigar os problemas relacionados às fissuras em aterros. A pesquisa contínua e detalhada sobre esse assunto é fundamental para aprimorar as práticas de construção e manutenção de aterros, garantindo maior segurança e durabilidade dessas estruturas.

Em suma, a construção de aterros sobre solos moles em áreas de baixadas do litoral brasileiro é uma prática necessária, porém desafiadora. O frequente surgimento de fissuras demanda uma abordagem cuidadosa, envolvendo uma análise geotécnica rigorosa e a implementação de medidas de mitigação de riscos. Somente através dessas ações integradas será possível assegurar a segurança e a durabilidade das estruturas construídas sobre esse tipo de terreno.

## Agradecimentos

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE) pela concessão de bolsa para o desenvolvimento da pesquisa e ao Laboratório de Métodos Computacionais em Geomecânica (LMCG) pelo apoio na pesquisa.

## Referências

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



AMIN, P., GHALIBAF, M. A., & HOSSEINI, M. **Land subsidence and soil Csacks monitoring by surveying on the clayey plain soils in Central Iran (case study: Yazd City)**, 2019.

AOKI, K., DONG, N.H., KANEKO, T. **Representation Method for Csacks on Drying 3D Solid by Physical Model**. *Electronics and Communications. Japan* 90 (Part 3), 50-59, 2007.

ARAÚJO, A. G. D. D. **Análise do processo de fissuras e do comportamento de estacas granulares ancoradas submetidas a secagem e umedecimento em solo expansivo**. Tese de doutorado, UFPE, Recife, 2020.

BELLO, M. I. M. **Estudo de ruptura em aterros sobre solos moles: Aterro de galpão localizado na BR-101/PE**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Pernambuco. UFPE. Recife, 2004.

BUDHU, M. **Soil mechanics fundamentals**. John Wiley & Sons, 2015

CASAGRANDE, A. **An Unsolved Problem of Embankment Stability on Soft Ground**. *Proceedings of the 1st Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico, 1959, Vol. 2, pp. 721-746. 1960.*

CERUTTI, R. **Análise de estabilidade e recalques de um aterro sobre solo mole-estudo de caso**. TCC -UNESC, 2011.

CHIRAPUNTU, S., & DUNCAN, J. M. **The role of fill strength in the stability of embankments on soft clay foundations (Vol. 9)**. WES, 1976.

COBE, E. P. **Comportamento de um aterro construído sobre solo mole e sua influência no estaqueamento adjacente** (Doctoral dissertation, PUC-Rio), 2017.

DA SILVA, F. K., MENEGUCCI, J. J., GODOI, C. S., & DA SILVA BARBOSA, C. **Aterros Sobre Solos Moles: Estudo de caso em Projeto de Acesso Multimodal**. In XII Simpósio de Práticas de Engenharia Geotécnica da Região Sul, 2019.

DASCAL, O., TOUMIER, J. P., TAVENAS, F. AND LAROCHELLE, P. **Failure of a Test Embankment on Sensitive Clay**. *Proceedings ASCE Specialty Conference on Earth and Earth-Supported Structures, Purdue University, Vol. 1, June, pp. 129-158, 1972.*

DE BRITO TABAJARA, J., SARDINHA, M. F. P., GERSCOVICH, D. M. S., & PACHECO, M. P. **Impacto da Interpretação do Perfil de Resistência Não Drenada em Estudos de Estabilidade de Aterros sobre Solos Moles**, 2020.

DUNCAN, J. M., WRIGHT, S. G., BRANDON, T. L. **Soil strength and slope stability**. John Wiley & Sons, 2014.

EIDE, O. & HOLMBERG, S. **Test Fills to Failure on the Soft Bangkok Clay**. *Proceedings of the ASCE Specialty Conference on Performance of Earth and Earth-Supported Structures, Purdue Univ., Vol. 1, June, pp. 159-180, 1972.*

EIDE, O. & HOLMBERG, S. **Test Fills to Failure on the Soft Bangkok Clay**. *Proceedings of the ASCE Specialty Conference on Performance of Earth and Earth-Supported Structures, Purdue Univ., Vol. 1, June, pp. 159-180, 1972.*

EIDE, O. **Undrained Shear Strength of Bangkok Clay**. *Proceedings of the Geotechnical Conference Oslo 1967, Oslo, Vol. 2, pp. 133-135, 1968.*

FERREIRA, S. R. D. M., & FERREIRA, M. D. G. D. V. X. **Mudanças de volume devido à variação do teor de água em um vertissolo no semiárido de Pernambuco**. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 33, 779-791, 2009.





FREITAS, B. A. D. **Análise numérica do comportamento do aterro sobre solo mole executado na obra do Hospital da Mulher do Recife-PE** (Master's thesis, Universidade Federal de Pernambuco). 2009.

GOLDER, H.Q. AND PALMER, D.J. **Investigation of a Bank Failure at SCsapsgate**. Isle of Sheppey, Kent, Geotech., Vol. 5, No. 1, March, pp. 55-73. 1955.

GUIMARÃES, L., GENS A., SÁNCHEZ, M., OLIVELLA, S. **A chemo-mechanical constitutive model accounting for cation exchange in expansive clays**. Géotechnique, Volume 63(3): 221 -234. 2013.

HORGAN, G.W., YOUNG, I.M. **An empirical stochastic model for the geometry of two dimensional Csack growth in soil (with discussion)**. Geoderma 96, 263-276, 2020.

LADD, C. C. **Test Embankment on Sensitive Clay**. Proc. of the ASCE Specialty Conf. on Earth and Earth-Supported Struc., Purdue University, Vol. 1, June, pp. 101-128, 1972.

LADD, C. C., ALDRICH, H. P. JR. AND JOHNSON, E. G. **Embankment Failure on Organic Clay**. Proc. of the 7th International Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg., Mexico City, 1969, Vol. 2, pp. 627-634, 1969.

LI, Z.W., YANG, X.L., LI, T.Z. **Static and seismic stability assessment of 3D slopes with Cracks**. Eng. Geol. 265, 105450, 2020.

LO, K.Y. & STERMAC, A.G. **Failure of An Embankment Founded on Varved Clay**. Canadian Geotech. Jour., Vol. 2, No. 3, pp. 234-253, 1965.

MACHADO, L. V. D. S. S. **Avaliação do deslocamento vertical de aterro sobre solo mole executado no projeto de duplicação da BR-101/PE** (Master's thesis), 2012.

MAEDO, M., SÁNCHEZ, M., ALJEZNAWI, D., MANZOLI, O., GUIMARÃES, L. J., & CLETO, P. R. **Analysis of soil drying incorporating a constitutive model for curling**. Acta Geotechnica, 15, 2619-2635, 2020.

MASSOCCO, N. S. **Análise de estabilidade de um aterro sobre solo mole e medidas de melhorias nas condições do solo**. Revista de Engenharia Civil IMED, 4(1), 81-96, 2017.

MUSIELAK, G., SLIWA, T. **Modeling and numerical simulation of clays Cracking during drying**. Dry. Technol. 33, 1758-1767, 2015.

ORTIGÃO, J. A. R. **Aterro experimental levado à ruptura sobre argila cinza do Rio de Janeiro**. Relatório de pesquisa-Instituto de Pesquisas Rodoviárias, DNER, Brasil, 1980.

PAIVA, S. C. **Estudo do Comportamento Geomecânico dos Solos Expansivos dos Municípios de Cabrobó, Paulista e Ipojuca/PE e de suas Misturas com Cal**. Tese de Doutorado da Universidade Federal de Pernambuco, Recife/PE, 168p. 2016.

PALMEIRA, E. M., FAHEL, A., & ORTIGÃO, J. A. R. **Aterros Reforçados com Geossintéticos Sobre Solos Moles**. Geossintéticos' 99, 2. 1999.

PARRY, R. H. G. AND MACLEOD, J. H. **Investigation of Slip Failure in Flood Levee at Launceston, Tasmania**. Proceedings of the 5th Australia- New Zealand Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Auckland, 1967, pp. 294-300, 1967.

PERBONI, J. P. **Análise de estabilidade e de compressibilidade de aterros sobre solos moles-caso dos aterros de encontro da ponte sobre o Rio dos Peixes (BR 381)**, 2003.



PILOT, G. **Study of Five Embankment Failures on Soft Soils**. Proceedings of the ASCE Specialty Conference on Performance of Earth and Earth-Supported Structures, Purdue University, Vol. 1, June, pp. 81-100, 1972.

PRAKASH, A., BORDOLOI, S., HAZRA, B., GARG, A., SREDEEP, S., & WANG, Q. **Probabilistic analysis of soil suction and Csacking in fibre-reinforced soil under drying-wetting cycles in India**. *Environmental Geotechnics*, 6(4), 188-203, 2019.

RODRÍGUEZ, R., SÁNCHEZ, M., LLORET, A. & LEDESMA, A. **Experimental and numerical analysis of a mining waste desiccation**. *Canadian Geotechnical Journal*. vol. 44 pp 644-658, 2007.

SÁNCHEZ, M., GENS, A. GUIMARÃES, L., & OLIVELLA, S. **Implementation Algorithm Of A Generalized Plasticity Model For Swelling Clays**. *Computer And Geotechnics*. Vol. 35 (6): 860-871. 2008.

SÁNCHEZ, M.; MANZOLI, O. L.; GUIMARÃES, L. J.N. **Modeling 3-D desiccation soil Csack networks using a mesh fragmentation technique**. *Computers and Geotechnics*, v. 62, p. 27-39, 2014.

SILVA, L. D. S. M. D. **Análise tridimensional de taludes em solos moles**. Dissertação - UERJ, 2021.

SOUZA NETO, D. P.; COUTINHO, R. Q.; SOUZA, F. Q. **Análise da ruptura de um aterro rodoviário construído sobre solos moles na cidade de Goiana-PE, Brasil**. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 7, p., 2022.

SOUZA, F. Q. D. **Estudo das propriedades geotécnicas e comportamentos dos aterros sobre solos moles da BR-101/Goiana-PE**. Tese-UFPE, 2018.

SOUZA, G. L. A. D. **Estudo da influência da duração do carregamento em projetos de aterros sobre solos moles destinados à construção de vias sujeitas ao tráfego de veículos especiais ultra-pesados**, 2017.

STIRLING, R.A., TOLL, D.G., GLENDINNING, S., HELM, P.R., YILDIZ, A., HUGHES, P.N., ASQUITH, J. D. **Weather-driven deterioration processes affecting the performance of embankment slopes**. *G éotechnique* 1-13, 2020.

TANG, C. S., WANG, D. Y., ZHU, C., ZHOU, Q. Y., XU, S. K., & SHI, B. **Characterizing drying-induced clayey soil desiccation Csacking process using electrical resistivity method**. *Applied Clay Science*, 152, 101-112, 2018.

TANG, C. S., ZHU, C., CHENG, Q., ZENG, H., XU, J. J., TIAN, B. G., & SHI, B. **Desiccation Csacking of soils: A review of investigation approaches, underlying mechanisms, and influencing factors**. *Earth-Science Reviews*, 216, 103586, 2021.

TANG, C.S., SHI, B., LIU, C., WANG, B.J. **Factors affecting the surface Csacking in clay due to drying shrinkage**. *J. Hydraul. Eng.* 38, 1186-1193, 2007.

TANG, C.S., WANG, D.Y., ZHU, C., ZHOU, Q.Y., XU, S.K., SHI, B. **Characterizing drying-induced clayey soil desiccation Csacking process using electrical resistivity method**. *Appl. Clay Sci.* 152, 101-112, 2018.

TEIXEIRA, C. D. C. **Análise de estabilidade de aterro sobre solos moles: estudo de caso**. TCC -UNESC, 2015.

TERZAGHI, K. **Theoretical Soil Mechanics**. Wiley, New York, 1943.

TSCHEBOTARIOFF, G. P. **Foundations, Retaining and Earth Structures**, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, 1977.



WANG, C., ZHANG, Z. Y., LIU, Y., & FAN, S. M. **Geometric and fractal analysis of dynamic Csacking patterns subjected to wetting-drying cycles.** *Soil and Tillage Research*, 170, 1-13, 2017.

WEI, X., GAO, C.Y., LIU, K. **Review of Csacking behavior and mechanism in clayey soils related to desiccation.** *Adv. Civ. Eng.* 8880873, 2020.

WILKES, P. F. **An Induced Failure at a Trial Embankment at King's Lynn, Norfolk, England.** *Proceedings ASCE Specialty Conference on Earth and Earth-Supported Structures*, Purdue University, Vol. 1, June, pp. 29- 63, 1972.

ZENG, H., TANG, C. S., CHENG, Q., INYANG, H. I., RONG, D. Z., LIN, L., & SHI, B. **Coupling effects of interfacial friction and layer thickness on soil desiccation Cracking behavior.** *Engineering Geology*, 260, 105220, 2019.

ZHANG, J., ZHU, D., ZHANG, S.H. **Shallow slope stability evolution during Rainwater infiltration considering soil Csacking state.** *Comput. Geotech.* 117, 103285, 2020.

ZHANG, W., XIAO, R., SHI, B., ZHU, H. H., & SUN, Y. J. **Forecasting slope deformation field using correlated grey model updated with time correction factor and background value optimization.** *Engineering geology*, 260, 105215, 2019.

ZHU, L., FAN, D.J., MA, R., ZHANG, Y.G., ZHA, Y.Y. **Experimental and numerical investigations of influence on overland flow and water infiltration by fracture networks in soil.** *Geofluids* 2018, 7056858, 2018.

ZHU, L., SHEN, T., MA, R., FAN, D., ZHANG, Y., & ZHA, Y. **Development of Csacks in soil: An improved physical model.** *Geoderma*, 366, 114258, 2020.

ZIESMANN, N. **Análise probabilística utilizando campos aleatórios aplicada à estabilidade de aterros sobre solos moles.** *Dissertação - UFSC*, 2023.