

ARMANDO DIAS DUARTE
(ORGANIZADOR)

Collection:

**APPLIED CIVIL
ENGINEERING
2**

ARMANDO DIAS DUARTE
(ORGANIZADOR)

Collection:

**APPLIED CIVIL
ENGINEERING
2**

**Atena**
Editora
Ano 2022

Editora chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Editora executiva

Natalia Oliveira

Assistente editorial

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto gráfico

Bruno Oliveira

Camila Alves de Cremo

Daphynny Pamplona

Luiza Alves Batista

Natália Sandrini de Azevedo

Imagens da capa

iStock

Edição de arte

Luiza Alves Batista

2022 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2022 Os autores

Copyright da edição © 2022 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-Não-Derivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

Conselho Editorial**Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Profª Drª Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Profª Drª Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná



Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Prof. Dr. Juliano Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora
Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista



Diagramação: Daphynny Pamplona
Correção: Mariane Aparecida Freitas
Indexação: Amanda Kelly da Costa Veiga
Revisão: Os autores
Organizador: Armando Dias Duarte

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

C697 Collection: applied civil engineering 2 / Organizador
Armando Dias Duarte. – Ponta Grossa - PR: Atena,
2022.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-258-0174-2

DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.742222604>

1. Civil engineering. I. Duarte, Armando Dias
(Organizador). II. Título.

CDD 624

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora

Ponta Grossa – Paraná – Brasil

Telefone: +55 (42) 3323-5493

www.atenaeditora.com.br

contato@atenaeditora.com.br



DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.



DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, *desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.



APRESENTAÇÃO

A coleção de trabalhos intitulada “*Collection: Applied civil engineering 2*” é uma obra que tem como foco principal a discussão científica por intermédio de diversos trabalhos que compõe seus capítulos. O volume abordará de forma categorizada e interdisciplinar, pesquisas cujos resultados possam auxiliar na tomada de decisão, tanto no campo acadêmico, quanto no profissional.

Os trabalhos desenvolvidos foram realizados em instituições de ensino e pesquisa no Brasil. Nos capítulos apresentados, são encontrados estudos de grande valia nas áreas de materiais da construção civil, métodos numéricos e segurança. A composição dos temas buscou a proposta de fundamentar o conhecimento de acadêmicos (as), mestres (as) e todos (as) aqueles (as) que de alguma forma se interessam pela área da Engenharia Civil, através de temáticas atuais com resoluções inovadoras, descritas nos capítulos da coleção. Sendo assim, a divulgação científica é apresentada com grande importância para o desenvolvimento de toda uma nação, portanto, fica evidenciada a responsabilidade de transmissão dos saberes através de plataformas consolidadas e confiáveis, como a Atena Editora, capaz de oferecer uma maior segurança para os novos pesquisadores e os que já atuam nas diferentes áreas de pesquisa, exporem e divulgarem seus resultados.

Armando Dias Duarte

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1..... 1

A INFLUÊNCIA DA UTILIZAÇÃO DE CINZA PESADA COMO SUBSTITUIÇÃO AO AGREGADO MIÚDO NATURAL EM ARGAMASSA

André Valmir Saugo Ribeiro

Jéssyca Mendes da Silva

Eduardo Nobre Guindani

Julia Beatriz Saugo Milani

Philippe Jean Paul Gleize

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.7422226041>

CAPÍTULO 2..... 13

MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS EM FACHADAS: UM ESTUDO DE CASO

Francisca Evânia Carvalho

Aridenise Macena Fontenelle

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.7422226042>

CAPÍTULO 3..... 20

ANÁLISE DE MODELOS DE CÁLCULO DE PONTES COM MÚLTIPLAS VIGAS

Luís Gabriel de Moura

Daniele Martins

Isadora Paczek

Guilherme Alves Correa

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.7422226043>

CAPÍTULO 4..... 32

ANÁLISE DA FORÇA CORTANTE EM LAJES COM VIGOTAS TRELIÇADAS

Rodrigo Bender

Daniele Martins

Isadora Paczek

Guilherme Alves Correa

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.7422226044>

CAPÍTULO 5..... 45

COMPARAÇÃO DE ARMADURA MÍNIMA EM VIGAS PROTENDIDAS EM PÓS-TRAÇÃO ADERENTE COM CAD E CRF

Fernando Machado Parizi

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.7422226045>

CAPÍTULO 6..... 58

MODOS DE FALHA EM BARRAGENS E O FENÔMENO DA LIQUEFAÇÃO

Rafaela Baldi Fernandes

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.7422226046>

CAPÍTULO 7	68
PRÉDIOS SOB AÇÃO DE TERREMOTO: ANÁLISE E PROJETO DE SISTEMA DE CONTROLE	
Denner Cirqueira Costa	
Wallysonn Alves de Souza	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.7422226047	
CAPÍTULO 8	76
APLICAÇÃO DE INSTRUÇÕES TÉCNICAS DO CBMPA PARA AVERIGUAÇÃO DAS MEDIDAS DE SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO EM INSTITUIÇÕES DE ENSINO	
Flaviany Luise Nogueira de Sousa	
Nuria Pérez Gallardo	
Tamara Daiane de Souza	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.7422226048	
SOBRE O ORGANIZADOR	88
ÍNDICE REMISSIVO	89

MODOS DE FALHA EM BARRAGENS E O FENÔMENO DA LIQUEFAÇÃO

Data de aceite: 01/04/2022

Rafaela Baldi Fernandes

RESUMO: Por definição, um modo de falha é uma causa de falha ou uma forma possível pela qual um sistema pode falhar. Quando um sistema tem muitas formas possíveis de falha, tem vários modos de falha ou riscos concorrentes, que devem ser avaliados de forma isolada e, posteriormente, considerando a influência de um sobre os demais.

PALAVRAS-CHAVE: Liquefação, modo de falha, barragens.

ABSTRACT: By definition, a failure mode is a cause of failure or a possible way in which a system can fail. When a system has many possible forms of failure, it has several failure modes or competing risks, which must be evaluated in isolation and, subsequently, considering the influence of one on the others. Static liquefaction is associated with the geotechnical characteristics of the material and loading conditions, and dynamic liquefaction with natural or induced earthquakes. In this sense, it is not necessarily a cause of failure and, only in some cases, it contributes to the global instability of a structure. The failure of dams where the phenomenon of liquefaction occurs is attributed to the failure mode of structural instability, when there is a generalized loss of strength of the structure, causing the collapse.

KEYWORDS: Liquefaction, failure mode, dams.

Por definição, um modo de falha é uma causa de falha ou uma forma possível pela qual um sistema pode falhar. Quando um sistema tem muitas formas possíveis de falha, tem vários modos de falha ou riscos concorrentes, que devem ser avaliados de forma isolada e, posteriormente, considerando a influência de um sobre os demais.

A liquefação estática está associada às características geotécnicas do material e das condições de carregamento e, a liquefação dinâmica à sismos naturais ou induzidos. Nesse sentido, não é necessariamente uma causa de falha e, somente em alguns casos, contribui para a instabilidade global de uma estrutura. A falha de barragens onde o fenômeno da liquefação ocorre é atribuída ao modo de falha de instabilidade estrutural, quando há uma perda generalizada de resistência da estrutura, causando o colapso.

As areias fofas, geralmente, apresentam uma tendência de redução de volume ao serem carregadas, o que gera uma condição de elevação de poropressão instantânea e, conseqüentemente, uma perda súbita de resistência, uma vez que há uma diminuição da tensão efetiva. Para as areias compactas, a tendência é de elevação de volume, com geração de poropressão negativa (sucção). Teoricamente, na fase inicial do carregamento, as areias compactas apresentam uma ligeira redução de volume mas, em função da dilatância,

que é caracterizada como o obstáculo gerado pelo contato grão-grão, a representatividade é do aumento de volume, que considera a passagem de um grão sobre o outro. Areias fofas e areias compactas tem comportamento muito distinto em ensaios triaxiais, o que remete a parâmetros de resistência diferenciados. Ao estabelecer o índice de vazios crítico, ou seja, quando a areia não dilata e não contrai com o cisalhamento, ou em outras palavras, quando há deformação sem alteração de volume, é possível identificar se trata-se de uma areia fofa ou compacta. Areias fofas tem índice de vazios maior que o índice de vazios crítico e, areias compactas, menores. Sob carregamento axial, solos com índice de vazios maior que o crítico, apresentam compressão pela expulsão de água do sistema, com consequente geração de poropressão positiva, haja visto que não há drenagem. Desta forma, há uma diminuição da tensão efetiva, com redução da resistência ao cisalhamento, ampliando a possibilidade de que ocorra liquefação. O ângulo de atrito das areias é o somatório do ângulo de atrito grão-grão (ϕ_u), rearranjo dos grãos (ϕ_a) e dilatância (ψ), além de ser variável a depender do índice de vazios crítico (e_o).

Quando um carregamento é aplicado sobre uma massa de solo ou rejeitos, a tendência é de que esse material diminua o índice de vazios para compensar a deformação, até atingir a máxima resistência dos grãos. Nesse caso, se as partículas estão densamente dispostas em um arranjo, como no caso das areias densas e argilas compactas, ao serem carregadas, primeiro irão se afastar para se mover durante o cisalhamento e, assim, aumentar de volume, sendo caracterizadas como um material dilatante. Por outro lado, se as partículas estão em um arranjo mais solo, como no caso das areias fofas, argilas moles ou materiais que foram dispostos hidráulicamente, há um agrupamento iniciado com o carregamento, quando a massa de solo comprime, diminui de volume e é característico de materiais contrácteis.

Em solos contrácteis saturados, a água inibe o movimento das partículas, fazendo com que tenha-se um acréscimo de poropressão. Considerando que a água é incompressível, ao continuar o carregamento, há ainda mais elevação de poropressão, reduzindo a tensão efetiva e, conseqüentemente, a resistência. Para os casos de carregamentos não drenados, onde não há fluxo de água (drenagem), a poropressão acelera o surgimento das tensões cisalhantes.

Desta forma, solos ou rejeitos granulares, saturados e com baixa densidade relativa, quando submetidos a um carregamento não drenado apresentam uma tendência de compressão e geração de poropressão positiva, ou seja, uma tendência à liquefação. O fenômeno da liquefação é caracterizado por uma elevada deformação decorrente da perda de resistência em solos sem coesão e saturados, com tendência à contração, durante o cisalhamento não drenado. Na literatura internacional, é referenciado por um comportamento denominado “*strain softening*”.

No caso das barragens com alteamento por montante, qualquer instabilidade no reservatório da estrutura afeta a fundação da parte do barramento apoiada sobre esse

reservatório. Aliás, esse é um dos motivos da condição geotécnica de se considerar segregação de rejeitos e adequado comprimento de praia, haja visto que se os materiais arenosos forem depositarem mais próximo ao barramento e, adensarem o suficiente para terem uma boa capacidade e suporte, minimiza-se possíveis perturbações nessa condição de ser um material de fundação para os alteamentos. Porções mais finas de rejeito, quando muito saturadas, como é o caso das polpas, possuem um tempo ampliado de adensamento e, em comparação com os materiais arenosos, geralmente, demoram a apresentar uma boa capacidade de suporte. Sendo assim, uma liquefação nos materiais dispostos no reservatório pode promover a instabilidade global dos barramentos alteados, fazendo com que toda essa massa instabilizada (material do reservatório + maciço alteado), atue como um carregamento dinâmico sobre o maciço inicial, considerando maciços em aterro argiloso compactado. Geralmente, esse carregamento excede as tensões resistentes, culminando em um colapso generalizado.

Para maciços e alteamentos que são construídos por hidrociclonagem, é uma condição de que o material arenoso (underflow) seja utilizado para construção do barramento e/ou alteamentos, sendo a porção fina depositada no reservatório. Para o caso de estruturas onde o dique inicial utiliza frações argilosas, devidamente compactada e com adequado sistema de drenagem, a parcela arenosa é utilizada para os alteamentos, mantendo-se a condição dos finos no reservatório. Nesse caso, parte da fração argilosa também pode ser depositada no reservatório, para que se forme um comprimento de praia e propicie uma melhor condição de fundação para os alteamentos. Para essa condição duas situações podem ser analisadas, como será apresentado a seguir.

No caso do maciço ser de material argiloso e os alteamentos de material ciclonado, com lançamento ou não de parte da fração arenosa no reservatório, a condição é muito parecida do caso genérico dos alteamentos por montante, quando um carregamento dinâmico proveniente da liquefação dos materiais do reservatório afeta a estabilidade global. Mas, no caso de maciço também construído com a fração arenosa, temos uma similaridade geotécnica dos materiais do maciço e reservatório pois, vieram de uma mesma jazida, passaram pelos mesmos processos de beneficiamento e, para disposição na barragem, somente foram separados granulometricamente. Nesse caso, uma liquefação no material do reservatório, além de promover um carregamento dinâmico, juntamente com a instabilidade dos alteamentos, induz o material do maciço a também se liquefazer, uma vez que as propriedades geotécnicas de ambos são similares.

A liquefação um fenômeno que acontece em solos contrácteis, saturados, confinados e em uma condição de carregamento não drenado. Ou seja, maciços de barragem sem alteamentos por montante, construídos com materiais que não apresentam potencial de liquefação, como é o caso de barramentos construídos com materiais não-contrácteis, podem ter a estabilidade afetada por conta de um carregamento dinâmico por liquefação dos materiais no reservatório mas, não é uma condição fundamental. Se devidamente

projetados para resistir a variações extremas de carregamento no reservatório, como devem ser, haja visto que o lançamento de polpa no reservatório já é um carregamento dinâmico, uma liquefação no reservatório não será um gatilho para uma falha estrutural (instabilidade global). A exceção é se o material utilizado no aterro também apresentar uma propensão a liquefação, quando o comportamento será similar ao dos aterros drenados.

As consequências da ruptura de uma barragem por falha estrutural decorrente do fenômeno da liquefação provoca deslocamentos de massa rápidos, de grande extensão, sendo que essa massa de solo flui até que as tensões cisalhantes de tornem pequenas.

O estudo do fenômeno da liquefação estática requer o entendimento da teoria do estado crítico dos solos granulares, da linha divisória entre estado crítico e estado permanente, além do parâmetro de estado e das razões de resistência de pico e liquefeita. Sendo assim, o potencial de liquefação de solos e rejeitos pode ser avaliado através de ensaios específicos. Em laboratório, o índice de vazios crítico pode ser obtido através de ensaios de cisalhamento direto mas, a deformação é limitada e há certa dificuldade em determinar os índices de vazio inicial e final durante o ensaio. Em ensaios triaxiais drenados de materiais compactos, a medição do índice de vazios não é representativa, uma vez que as mudanças de volume ocorrem em pequenas zonas onde a ruptura acontece. Para ensaios triaxiais drenados em materiais fofos, não há plano de ruptura e grandes deformações são necessárias para se ter índices de vazios crítico. Desta forma, percebe-se a dificuldade de obtenção do índice de vazios crítico mas, é um fato de que o índice de vazios crítico reduz com o aumento de tensões e , a análise da linha de estado crítico facilita essa compreensão sobre o potencial de liquefação, como apresentado na Figura 1. A linha de estado crítico (LEC) representa condições drenadas e refere-se a solos dilatantes e contrácteis. Para o caso de condições não drenadas, tem-se a linha de estado permanente (CSL ou EEP). As duas linhas são similares, sendo que no caso do estado crítico tem-se índice de vazios *versus* logaritmo da tensão confinante e , para linha de estado permanente, índice de vazios *versus* logaritmo da resistência não drenada S_u . Essa similaridades faz com que seja possível relacionar, diretamente, a resistência não drenada com as tensões confinantes, que é obtida em ensaios triaxiais não consolidados e não drenados (Tipo UU). Ambas, LEC ou CSL, separam o comportamento contráctil do dilatante, uma vez que para qualquer tensão média confinante efetiva p' , haverá algum índice de vazios no qual não há tendência para aumento e diminuição de volume durante o cisalhamento.

O parâmetro de estado é definido pela diferença entre o índice de vazios do solo in situ, antes do cisalhamento, para uma dada tensão confinante efetiva (e_0) e o índice de vazios do solo na condição de estado permanente, sob mesma tensão confinante, sendo $\psi = e_0 - e_{ep}$. Em gráficos do tipo índice de vazios *versus* logaritmo de p' , a distância de um determinado ponto referente a um índice de vazios até a linha de estado crítico representa a contractilidade, ou seja, o parâmetro de estado, como apresentado na Figura 2. De uma forma geral, valores positivos de ψ referem-se a solos com tendência a diminuir de volume,

ou seja, susceptibilidade a liquefação, ao passo de que solos com valores negativos de ψ , apresentam uma tendência a dilatar, ou seja, sem susceptibilidade a liquefação. Embora, em teoria, materiais contrácteis são os que tem $\psi > 0$, na prática, $\psi > -0,05$ muitas vezes é adotado como o limite.

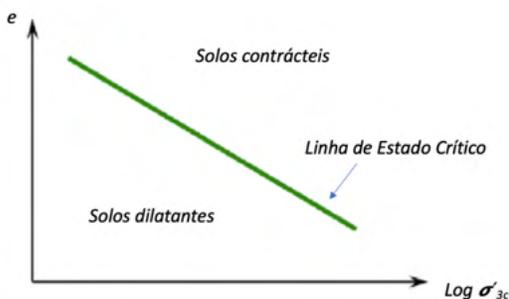


Figura 1 – Linha de estado crítico e de estado permanente.

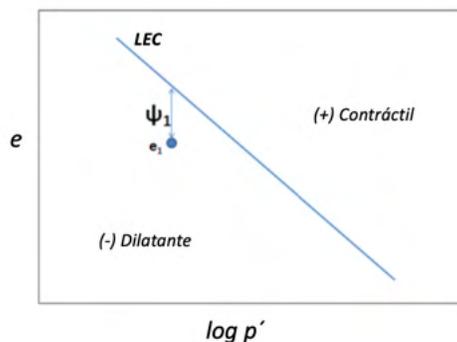


Figura 2 – Definição do parâmetro de estado em relação a LEC.

Durante a liquefação estática, a tensão cisalhante aumenta até a resistência de pico (P), deformando até o estado permanente e , nesse caso apresentando uma resistência liquefeita (S). Sendo assim, a linha característica é a linha de colapso ou linha de fluxo por liquefação (LFL), expressa em termos das resistências de cisalhamento de pico obtidas em ensaios triaxiais. Nesses casos, o gatilho da liquefação é ativado somente se a tensão cisalhante atuante ultrapassar a LFL durante um carregamento não drenado.

No caso da Figura 3, os pontos A e B estão abaixo do ponto de estado permanente e , nesse caso, representam material sem susceptibilidade a liquefação ou, ainda, carregamentos que não induzem a liquefação. Já os pontos C, D e E, acima do ponto de estado permanente, há um comportamento contráctil, com a mobilização de pico de resistência não drenada, ou seja, o material irá se deformar até atingir envoltória do estado permanente (EEP) no ponto da resistência liquefeita.

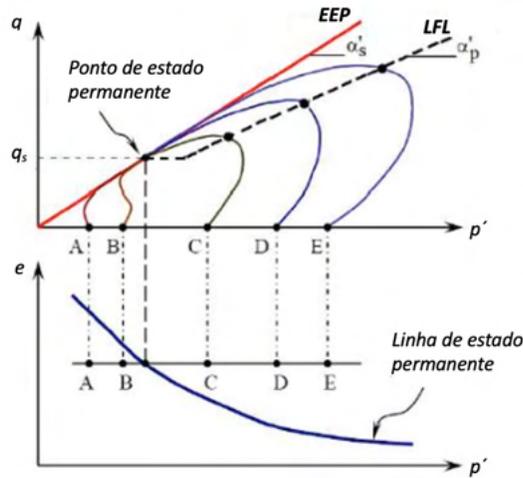


Figura 3 – Exemplo de análise para linhas LFL.

Olso (2001), correlaciona razões de resistência ao cisalhamento à penetrações normalizadas de ensaios SPT e CPT/CPTu, que permitem avaliar a susceptibilidade a liquefação, a propensão da ativação do gatilho de liquefação e a avaliação de estabilidade em relação a resistência liquefeita.

Robertson (2009), estabelece critérios para a análise de dados provenientes de ensaios CPTu que permitem avaliar, em campo, materiais com potencial de liquefação, através do gráfico de resistência a penetração do cone *versus* índice de atrito normalizado.

Sadrekarimi (2014), também apresenta correlações que permitem comparar o coeficiente resistência não drenada antes e depois do deslizamento fluido por liquefação, avaliando a perda de resistência.

A susceptibilidade de liquefação estática em um material é influenciada pela distribuição granulométrica da fração sólida, tipo de mineralogia, composição química, massa específica dos grãos, mudança do índice de vazios com o tempo, resistência ao cisalhamento drenado e não drenado, além de questões associadas a permeabilidade. Os gatilhos para a liquefação podem ser genericamente agrupados como sendo eventos de carregamento rápido, rápida elevação de freática, movimentos de massa na área de influência dos depósitos e qualquer situações que eleve, positivamente, a poropressão e reduza a tensão efetiva. Nas análises de estabilidade é importante que sejam considerados a resistência não drenada liquefeita, baseada em parâmetros $S_u(\text{liq})$, facilmente obtida através de correlações com ensaios do tipo CPTu.

Quando o cisalhamento de um solo saturado, contráctil, é lento, a poropressão se dissipa, produzindo uma condição drenada e, dessa forma, mantendo a resistência. Quando o cisalhamento de solo saturado, contráctil, é rápido, a poropressão não dissipa, produzindo uma condição drenada e, nesse caso, desencadeando um cisalhamento não

drenado.

Na liquefação estática, a tensão média confinante efetiva ou tensão de cisalhamento (p') em amostras de areia adensadas, quando apresentam um carregamento não drenado (rápido) e a trajetória de tensões atinge a envoltória de resistência, há uma perda rápida de resistência ou seja, liquefação. O descarregamento é drenado e ocorre de forma lenta mas, também ao atingir a envoltória de resistência indica uma perda de resistência (liquefação). Sendo assim, tem-se que liquefação estática ocorre tanto por carregamento quando por descarregamento.

Para a avaliação da liquefação dinâmica, realiza-se análises pseudo-estáticas e, a partir do valor de aceleração máxima estima-se uma força estática que represente o efeito sísmico, sendo considerado atuante na base do terreno. Esta aceleração é variável em cada região e, por exemplo, em Minas Gerais, é em torno de 0,15g. Após a estimativa ou medição da aceleração, este valor é convertido para uma força horizontal estática que equivale à metade da intensidade e, considerando a aceleração apresentada tem-se um valor de 0,075g. Para efeitos de sismo induzido (detonação), a força horizontal estática é da ordem de 0,050g. Nas análises, opta-se pelo maior valor estimado entre o sismo natural e o sismo induzido, considerando que, na prática, não ocorrem simultaneamente.

Nas detonações, as pressões nos furos é da ordem de 2 a 12 GPa, sendo a maior parte atuante na quebra do grão. Parte passa pelo maciço rochoso na forma de ondas e provocam vibrações, até que sejam dissipadas, sendo consideradas ondas de choque instáveis e ondas de alta velocidade (body waves). Há ainda uma parcela da pressão que é transmitida a atmosfera, provocando ruídos. A vibração do terreno está associada a ondas internas, ou de corpo, denominadas ondas primárias (P) e secundárias (S), além das ondas superficiais Rayleigh (R) e Love (L). As ondas P são, geralmente, de maior velocidade e pouco destrutivas, sendo as ondas S mais destrutivas em relação ao movimento de massa do solo. As ondas R e L são de baixa frequência, também muito destrutivas, e se propagam como um epicentro.

A extrusão lateral baseia-se na presença de areias fofas saturadas, sobrejacentes a lamas moles, com confinamento de argila

- Altura cresce e lama é carregada verticalmente
- As areias sobrejacentes tendem a se mover com a lama, mas possuem baixa ductilidade (flexibilidade)
- Resultado: surgem mudanças de tensão que tendem a reduzir o confinamento lateral das areias
- Induz ao colapso da areia saturada, ou desenvolvimento de trincas no material insaturado
- Pode ser observado em ensaios triaxiais drenado

A liquefação já vem sendo apontada como um dos fatores que podem culminar na

instabilidade de estruturas geotécnicas desde o observado na ruptura de Aberfan em 1966, como demonstrado na Tabela 1. A liquefação estática está relacionada as características geotécnicas dos materiais e, a liquefação dinâmica, aos sismos, que podem ser divididos em sismos naturais ou induzidos. Mas, deve atentar para o fato de que trata-se de um fenômeno, inerente às características geotécnicas do material ou das condições de carregamento dinâmico, não sendo, necessariamente, um modo de falha.

Data	Local		Tipo	Tipo de liquefação
Janeiro, 2019	Brasil	Brumadinho (MG)	Ferro	Estática
Março, 2017	China	Tonglvshan Mine, Província Hubei	Cobre e Ouro	Estática
Novembro, 2015	Brasil	Fundão (MG)	Ferro	Estática
Outubro, 2010	Hungria	Reservatório 10 em Ajka	Bauxita	Estática
Março, 2004	USA	Big Bay Lake (Mississippi)	Acumulação de água	Estática
Fevereiro, 1994	África	Merriespruit	Ouro	Estática
Agosto, 1991	Canadá	Sullivan Mine, Kimberley, British Columbia	Chumbo e Zinco	Estática
Maio, 1986	Brasil	Itabirito, Minas Gerais	Metal	Estática
1985	USA	Olinghouse, Wadsworth, Nevada	Ouro	Estática
Outubro, 1980	USA	Tyrone, New Mexico	Cobre	Estática
Abril, 1975	Bulgária	Madjarevo	Chumbo, Zinco, Ouro	Estática
Fevereiro, 1972	Virgínia	Barragem 3 Pitson Coal	Carvão	Estática
Fevereiro, 1971	Los Angeles	Van Norman	Acumulação de água	Dinâmica
1970	África	Mufulira, Zambia	Cobre	Estática
1969	Espanha	Bilbao	Metal	Estática
Outubro, 1966	Reino Unido	Aberfan, Wales	Carvão	Estática

Tabela 1 – Rupturas de barragens associadas ao fenômeno da liquefação.

O estudo de falhas apresentado pelo ICOLD/USCOLD em 2001, contabilizou 517 casos de falhas, sendo associadas a galgamento, instabilidade de taludes, terremotos, fundação, infiltração, estruturais, erosão, subsidência de mina e casos desconhecidos. O CSP2, divulgou um levantamento referente a falhas em 289 rupturas, no ano de 2017,

separadas por causas desconhecidas, galgamento, instabilidade de taludes, terremotos, erosões interna e piping, falha estrutural da fundação, estrutural, erosão interna e subsidência. A WMTF divulgou em 2018 um levantamento similar ao apresentado pelo CSP”, inclusive com a mesma divisão relacionada aos modos de falha. AASDSO apresentou em um estudo referente aos anos de 2010-2017, cerca de 280 falhas, considerando galgamento, piping, problemas relacionados a vertedouros e comportas, estabilidade de taludes, deficiência da fundação, erosão, dentre outras. Avaliando esses levantamentos de rupturas e, comparando com dados da literatura disponível, percebe-se que a liquefação não é alocada diretamente como um modo de falha, haja visto que trata-se de um fenômeno que desencadeia um modo de falha de natureza estrutural. As referências destes dados, bem como a proposição de uma divisão técnica referente aos modos de falha aplicados a barragens, é apresentado no livro “Panorama Geotécnico das Rupturas de Barragens e Gestão de Risco” (Fernandes, 2020), sendo:

Modos de Falha

- Galgamento
- Erosão interna e Piping
- Estruturais
 - Terremoto (liquefação dinâmica)
 - Liquefação estática
 - Fundação
 - Subsidência
 - Instabilidade de taludes
 - Deslizamentos e erosões
 - Diversas

A correta compreensão dos modos de falha e dos fenômenos associados a cada modo de falha é imprescindível para garantia da confiabilidade dos estudos apresentados, além da aplicação correta de análises de estabilidade, percolação, deformação, estimativa dos parâmetros de resistência e dos fatores de estabilidade, dentre outros. Além da análise dos modos de falha e fenômenos associados, as causas, frequências e impactos das falhas constituem uma análise de risco robusta, que permitem implantar ações e planos corretivos adequados.

REFERÊNCIAS

FERNANDES, R. B. (2020). Panorama Geotécnico das Rupturas de Barragens e Gestão de Risco. Ed. Appris, Curitiba. 405 p.

Olson, S. M. (2001). *Liquefaction analysis of level and sloping ground using field case histories and penetration resistance*. Ph.D. thesis, Univ. of Illinois at Urbana–Champaign, Urbana, Ill.

ROBERTSON, P. K. (2009). *Interpretation of cone penetration tests – a unified approach*. Canadian Geotechnical Journal, 46: 1337-1355

SADREKARIMI, A. (2014). *Effect of the Mode of Shear on Static Liquefaction Analysis*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 140, n. 12, 2014.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Análise de estruturas 20

Análise experimental 32

Análise teórica 32

Areias 58, 59, 64

Argamassa 1, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 14, 15, 17, 18, 19

Armadura transversal 32, 34, 40, 41, 42, 44

B

Barragem 60, 61, 65

C

CAD 45

CBMPA 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 86

CRF 45, 48, 54

D

Desigualdades matriciais lineares 68, 69, 70

Distribuição 20, 21, 31, 63

E

Estabilidade de lyapunov 69

Estado endurecido 1, 4, 5, 8

Estado fresco 1, 2, 4, 5, 6, 7

F

Fachadas 13, 14, 16, 17, 18, 19

Força cortante 32, 33, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44

I

Incêndio 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 86, 87

Instruções técnicas 77, 78, 79, 81, 86

L

Laje treliçada 32, 42

Liquefação 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66

M

Massa 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 59, 60, 61, 63, 64, 72, 73, 74

Medidas de segurança 77, 78, 82, 84, 85, 86

Métodos 2, 3, 10, 19, 20, 21, 25, 26, 29, 31, 45, 47

Modo de falha 58, 65, 66

P

Patologia 13, 16, 17, 18

Pontes 20, 21, 57

PONTES 20, 21, 31, 48

Pós-tração aderente 45, 46, 55, 57

Protendido 31, 45, 46, 47, 48, 49, 52, 56, 57

R

Revestimento cerâmico 13, 15, 19

S

Sinistro 77, 78, 79, 80

Sistemas lineares 68, 70, 76

T

Terremotos 65, 66, 68, 69, 71, 72

V

Viga 18, 29, 45, 47, 48, 49, 50, 52, 54, 55

 www.atenaeditora.com.br

 contato@atenaeditora.com.br

 @atenaeditora

 www.facebook.com/atenaeditora.com.br

Collection:

APPLIED CIVIL ENGINEERING 2

 www.atenaeditora.com.br

 contato@atenaeditora.com.br

 @atenaeditora

 www.facebook.com/atenaeditora.com.br

Collection:

APPLIED CIVIL ENGINEERING 2