

Aplicação de geodrenos para controle do excesso de poropressões e reforço de estruturas

Michel Fontes

CEO, Fonntes Geotécnica, Belo Horizonte, Brazil, michel.fontes@fonntesgeotecnica.com

Rodrigo Pereira de Almeida

Engenheiro Geotécnico, Fonntes Geotécnica, Belo Horizonte, Brazil, rodrigo.almeida@fonntesgeotecnica.com

Giovana Abreu de Oliveira

Engenheira Geotécnica, Fonntes Geotécnica, Belo Horizonte, Brazil, giovana.oliveira@fonntesgeotecnica.com

Alexandre Santos

Engenheiro Geotécnico, Fonntes Geotécnica, Belo Horizonte, Brazil, alexandre.santos@fonntesgeotecnica.com

Emily Cristina

Engenheira Geotécnica, Fonntes Geotécnica, Belo Horizonte, Brazil, emily.cristina@fonntesgeotecnica.com

RESUMO: Ao longo do tempo, algumas estruturas geotécnicas foram construídas sobre fundações com capacidade de suporte relativamente baixa. Embora análises com parâmetros drenados inicialmente atendessem às normativas desse tipo de estrutura, as resoluções 13 e 95 da Agência Nacional de Mineração, emitidas em 2019 e 2020, respectivamente, impuseram novos critérios, exigindo fatores de segurança superiores a 1,3 e análises com parâmetros não drenados. Isso se deveu, em parte, à ruptura de Corrêgo do Feijão, destacando a necessidade de revisão das práticas adotadas e da solução de reforço ou melhoramento das estruturas em condições de instabilidade. Nesse sentido, sabe-se que materiais sujeitos a parâmetros não drenados podem apresentar rupturas rápidas sob certas condições, como aumento abrupto de cargas ou sismos, devido ao acúmulo rápido de poropressões. Assim, uma das soluções para a dissipação do excesso de poropressões e melhoramento da fundação dessas barragens seria a adoção de geodrenos, que funcionam dissipando a água interior para a superfície. Este artigo trata de um estudo de caso no qual a fundação da estrutura apresentava as características supracitadas e, como solução para o problema, foram aplicados geodrenos nas regiões de saturação onde o material apresentava comportamento não drenado. Ainda, antes e após a instalação dos geodrenos, foram executados ensaios CPTu, que revelaram uma redução significativa do excesso de poropressões durante a execução do ensaio, evidenciando o potencial dos geodrenos como método de reforço e melhoria da segurança em estruturas geotécnicas.

PALAVRAS-CHAVE: Geodrenos; Poropressão; Ruptura; Condição não-drenada.

ABSTRACT: Over time, some geotechnical structures have been built on foundations with relatively low bearing capacity. Although analyses with drained parameters initially complied with the regulations for such structures, Resolutions 13 and 95 from the National Mining Agency, issued in 2019 and 2020 respectively, imposed new criteria, requiring safety factors above 1.3 and analyses with undrained parameters. This was partly due to the rupture at Corrêgo do Feijão, highlighting the need to review adopted practices and to reinforce or improve structures under unstable conditions. It is known that materials subject to undrained parameters can undergo rapid ruptures under certain conditions, such as sudden increases in loads or earthquakes, due to the rapid accumulation of pore pressures. Thus, one solution for dissipating pore pressures and improving the foundation of these dams would be the adoption of geodrains, which function by dissipating water from the interior to the surface. This article addresses a case study in which the foundation of the structure exhibited the aforementioned characteristics, and, as a solution to the problem, geodrains were applied in saturation regions where the material exhibited undrained behavior. Furthermore, before and after the installation of geodrains, Cone Penetration Test (CPTu) were conducted, revealing a significant reduction

in pore pressures, demonstrating the potential of geodrains as a method for reinforcing and improving safety in geotechnical structures.

KEYWORDS: Palavras chaves em inglês seguindo as mesmas regras da versão em português

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a engenharia geotécnica tem enfrentado desafios consideráveis relacionados à estabilidade e segurança de estruturas construídas sobre fundações com capacidade de suporte relativamente baixa. A promulgação das resoluções 13 e 95 pela Agência Nacional de Mineração em 2019 e 2022, respectivamente, reflete uma resposta direta a eventos como a devastadora ruptura de Corrégo do Feijão, destacando a urgente necessidade de revisão das práticas de projeto e de soluções eficazes para reforçar e melhorar a estabilidade dessas estruturas.

Uma das preocupações fundamentais é a resposta dos materiais sujeitos a parâmetros não drenados, que podem experimentar rupturas rápidas sob condições específicas, como aumento repentino de cargas ou atividades sísmicas, devido ao acúmulo acelerado de poropressões. Diante desse cenário, a aplicação de geodrenos emerge como uma solução promissora para dissipar poropressões e fortalecer as fundações de barragens e estruturas similares.

Neste contexto, estudos de caso têm sido fundamentais para ilustrar a eficácia dos geodrenos como medida de reforço. Borges (2003) realizou um estudo aplicando um modelo numérico baseado no método dos elementos finitos para verificar o comportamento tridimensional de um aterro sobre solos argilosos moles, incorporando geodrenos verticais. São postos em evidência os aspectos fundamentais do comportamento destas obras, comparando os resultados do aterro utilizando os geodrenos (análise tridimensional) com os resultados da análise bidimensional do mesmo problema sem os drenos verticais.

Além disso, em outro estudo de caso realizado por Santos (2018), os geodrenos foram empregados para aterros sobre solo mole a partir de coeficientes de adensamento obtidos em ensaios oedométricos e de piezocone. A análise pós-implementação revelou uma redução notável nas poropressões, corroborando a eficácia dessa abordagem para melhorar a estabilidade das estruturas geotécnicas.

Esses exemplos destacam a importância dos estudos de caso na avaliação e validação de técnicas de reforço, como o uso de geodrenos, para enfrentar os desafios de estabilidade em barragens e estruturas similares. Neste sentido, este artigo apresenta um estudo de caso que ilustra a aplicação bem-sucedida de geodrenos como medida de reforço em uma estrutura com fundação suscetível a comportamento não drenado. Através dessa intervenção, foi possível enfrentar os desafios associados ao acúmulo de poropressões e melhorar significativamente a segurança da estrutura. A análise incluiu a realização de ensaios CPTu antes e após a instalação dos geodrenos, fornecendo dados concretos sobre a redução das poropressões e validando a eficácia dessa abordagem como método de reforço e aprimoramento da estabilidade em estruturas geotécnicas.

2 METODOLOGIA

2.1 Caracterização dos Solos Moles

Os solos moles em fundações são frequentemente associados à condição não drenada, onde a resistência ao cisalhamento pode ser significativamente influenciada pela saturação e contratividade do solo. Segundo Robertson (2016), a resistência ao cisalhamento dos solos saturados pode variar significativamente com base em sua contratibilidade ou dilatância. Solos contráteis tendem a apresentar resistência ao cisalhamento inferior em carregamentos não drenados em comparação com carregamentos drenados, enquanto solos dilatantes mantêm ou até mesmo aumentam sua resistência em condições não drenadas.

É importante ressaltar que solos contráteis também podem manifestar uma resposta de amolecimento sob carregamentos não drenados, embora essa condição não seja universal para todos os solos dessa categoria. Tal amolecimento pode levar à instabilidade da estrutura, resultando em fenômenos como liquefação.

A liquefação, um fenômeno crítico, pode ocorrer tanto em materiais arenosos de baixa coesão quanto em argilas sensíveis de baixa plasticidade, quando saturados ou quase saturados. Embora a resposta de amolecimento em solos argilosos seja geralmente mais gradual, materiais classificados como "clay like soils" também podem gerar excesso de poropressão significativo, influenciando sua resistência ao cisalhamento não drenado (Robertson, 2016).

Também, é importante reconhecer que construir barragens sobre solos moles representa uma problemática geotécnica. A capacidade de suporte desses solos é relativamente baixa, o que pode comprometer a estabilidade e segurança da estrutura. A presença de solos moles exige cuidados adicionais no projeto e construção das barragens, incluindo a implementação de medidas de reforço e controle de poropressões, como o uso de geodrenos, para garantir a estabilidade e durabilidade da obra. Neste artigo, será tratado um estudo de caso de uma barragem alteada sobre uma fundação em solo com a capacidade de suporte baixa e as características supracitadas. Dada a problemática, foi necessário buscar entender sobre as características do solo da fundação e as possíveis soluções para estabilização da estrutura geotécnica.

2.2 Descrição da Barragem

A Barragem estudada foi construída em 1999 com a função de armazenar os rejeitos gerados no processo de beneficiamento de minério de estanho e nióbio e foi registrada com uma vida útil prevista de 15 anos. A estrutura está apoiada em um material de Aluvião, com predominância arenosa abaixo do maciço e argilosa nas demais regiões, de aproximadamente 10 metros de espessura e com NSPT médio de 5 golpes. Após o Aluvião é observada uma camada de Solo Residual Jovem (SRJ) abaixo do maciço e reservatório e uma camada de Solo Residual Maduro (SRM) do pé da estrutura para jusante, com NSPTs médios de 16 e 8 golpes, respectivamente, ambas camadas apresentam uma espessura máxima de 6 metros. Com esses dados, percebe-se a variedade de materiais que compõe a fundação da estrutura, além do fato de que, alguns deles, apresentam capacidade de muito mole a fofo, o que é um problema quando se trata de uma fundação que necessita de capacidade de suporte para as tensões geradas pelo aterro e rejeito disposto. Após o solo residual, a estrutura já está apoiada em rocha que, conforme estudos geológicos, foi classificado como Granito com grau de alteração variando de A1 a A3.

A seção crítica do estudo possui um total de 6 sondagens SPT e 2 ensaios CPTu, conforme apresentado na Figura 1.

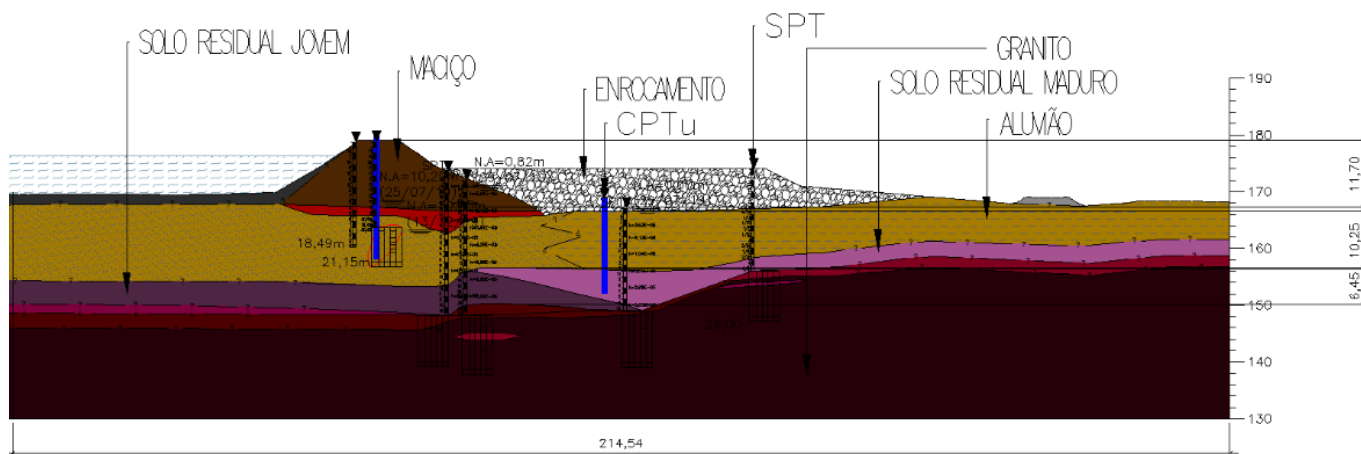


Figura 1 – Seção crítica da barragem estudada – Dimensões em metros

2.2 Ensaios realizados

2.1.1 CPTu

Foram realizados ensaios de Piezocone (CPTu) antes e depois das obras com o objetivo de avaliar as poropressões presentes no solo e comparar as condições antes e após a implementação das medidas de reforço. O *Cone Penetration Test with pore pressure measurement* (CPTu) é uma técnica geotécnica utilizada para caracterizar o perfil do solo e determinar suas propriedades físicas e mecânicas. Consiste na inserção de um cone equipado com sensores de pressão, resistividade e atrito em um furo de sondagem, permitindo a medida da resistência ao atrito ao longo do perfil do solo, bem como a pressão intersticial durante o ensaio. Essas informações são fundamentais para compreender o comportamento do solo sob diferentes condições de carregamento, incluindo a avaliação das poropressões, que são pressões de água intersticial excessivas que podem afetar a estabilidade das estruturas geotécnicas. A comparação das poropressões antes e depois da implementação das obras permite avaliar a eficácia das medidas adotadas e sua influência na estabilidade da estrutura.

2.2 Dimensionamento dos Geodrenos

Tendo em vista a existência de materiais com comportamento de baixa resistência ao longo da fundação da Barragem e da constatação de seu comportamento contrátil, foi proposta a aplicação de geodrenos verticais em regiões específicas a jusante do maciço da estrutura. Os geodrenos tiveram como finalidade garantir a drenabilidade do solo mole saturado, provocando assim a dissipação do excesso de poropressão e, conseqüentemente, o adensamento desse material.

Os geodrenos utilizados na Barragem são constituídos por um núcleo drenante de PEAD (Polietileno de Alta Densidade), em forma de canais, envolto em geotêxtil não tecido de PET (Poliéster). Basicamente, o funcionamento ocorre com a captação da água através dos canais verticais, sua suspensão por capilaridade até a camada drenante posicionada no terreno e seu direcionamento para o sistema de drenagem superficial. Nesse contexto, o geotêxtil de PET funciona como um filtro na retenção das partículas de solo.

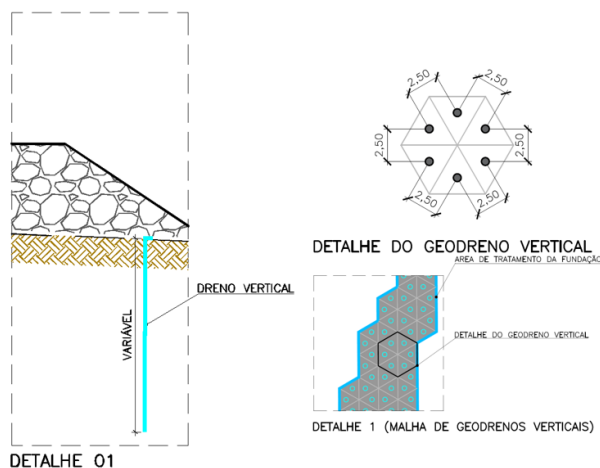


Figura 2 – Detalhe do geodreno utilizado

2.2.1 Análise de Estabilidade

Para auxiliar no dimensionamento dos geodrenos, foram conduzidas análises de estabilidade no software Slide2, utilizando a Teoria do Equilíbrio Limite, além dos métodos de Sarma e GLE Morgenstern-Price, e superfície de ruptura não circular. Nestas análises, foram avaliadas superfícies de ruptura potenciais. Este procedimento visou identificar as áreas críticas onde os geodrenos seriam estrategicamente posicionados para interceptar essas superfícies, mitigando assim os efeitos adversos das poropressões excessivas. Após a instalação dos geodrenos, uma nova análise de estabilidade foi conduzida, considerando as propriedades dos materiais com parâmetros não drenados nas áreas desprovidas de geodrenos e parâmetros drenados nas áreas onde os geodrenos foram implementados.

3 RESULTADOS

Antes da aplicação do geodrenos, a estrutura em estudo apresentou fator de segurança para a condição não drenada de pico abaixo do valor mínimo determinado na Resolução ANM 95/2022 ($FS > 1,30$), conforme análises de equilíbrio limite feitas na seção central da estrutura (Figura 1). Já para a condição drenada o fator de segurança foi de 1,50, valor esse dentro do preconizado pela ABNT NBR 13.028/2017 que trata dos requisitos mínimos para elaboração e apresentação de projetos de barragens.

Sendo assim, a avaliação realizada indica que a estrutura, em sua configuração passada, não possuía estabilidade para a condição não drenada. Conclui-se, pelas análises e pelo acompanhamento em campo do fluxo d'água no pé da estrutura, que a mesma estava atuando em condição drenada e, além disso, pela necessidade de intervenção visando a garantia da condição de segurança satisfatória também na condição não drenada.

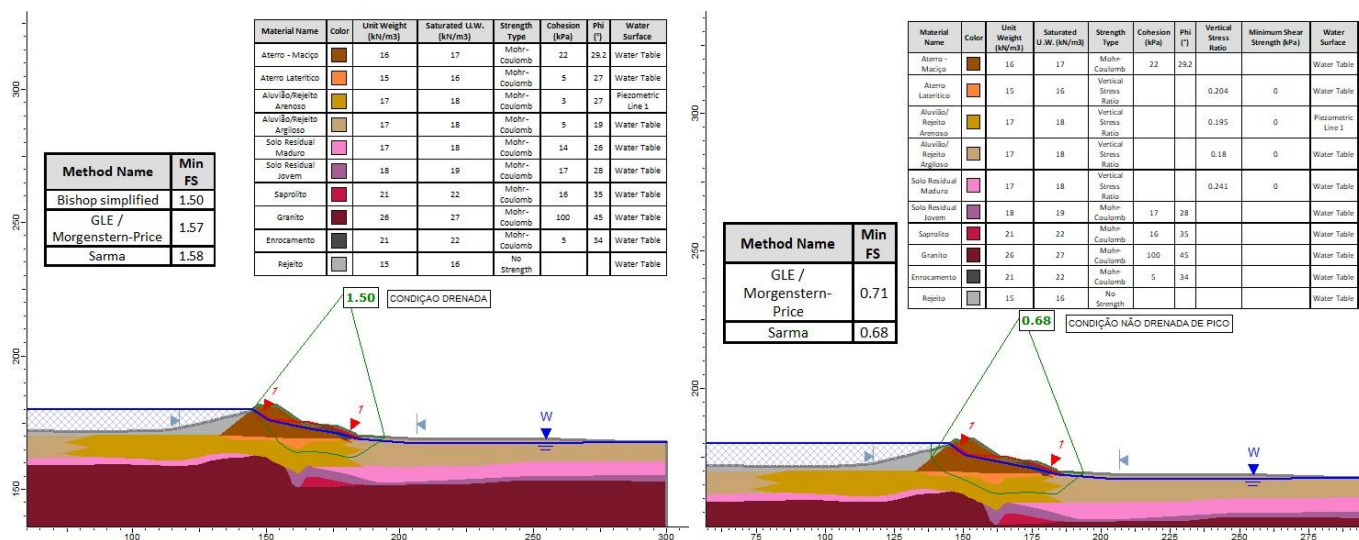


Figura 1. Análise de estabilidade realizada antes das intervenções – FS = 1,50 (Drenada) FS = 0,68 (Não Drenada).

Para a estabilização da estrutura, foram realizadas as intervenções detalhadas no item 2, onde, além da realização de uma berm de reforço de enrocamento, foram executados geodrenos verticais em determinada região do aluvião argiloso (ALUVIÃO) e do solo residual maduro (SRM) com a finalidade de que o material apresentasse maior drenabilidade, visando um comportamento drenado ao longo do tratamento de fundação. A Figura 2 apresenta o gráfico de poropressões, tanto a poropressão hidrostática (u_0) quanto a geração do excesso de poropressão (u_2), para um ensaio CPTu antes da aplicação dos geodrenos e outro após a aplicação.

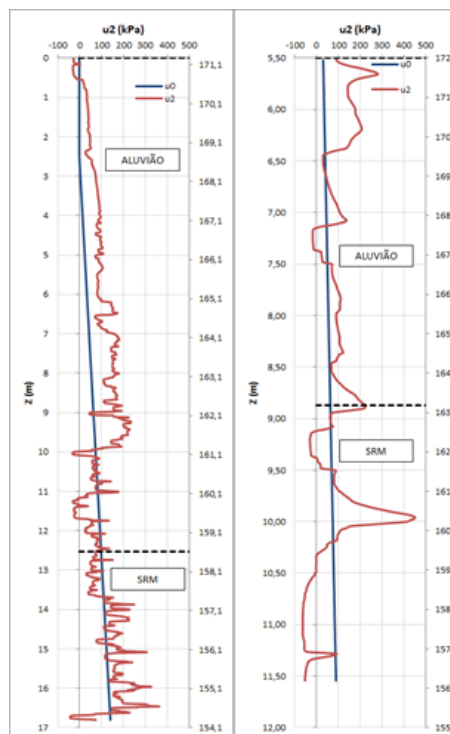


Figura 2. Geração de excesso de propressão – Antes e após as intervenções de reforço da estrutura.

Para a avaliação do comportamento contrátil-dilatante do Aluvião e SRM, foram empregadas as metodologias de Robertson (2016) e Jefferies e Been (2016). A Figura 3 apresenta o Ábaco comportamental proposto por Robertson (2016), onde é possível observar que no ensaio CPTu anterior ao tratamento, ambos os materiais, em sua totalidade, apresentavam um comportamento contrátil, e que, após as intervenções boa parte das profundidades avaliadas agora se encontram com um comportamento dilatante.

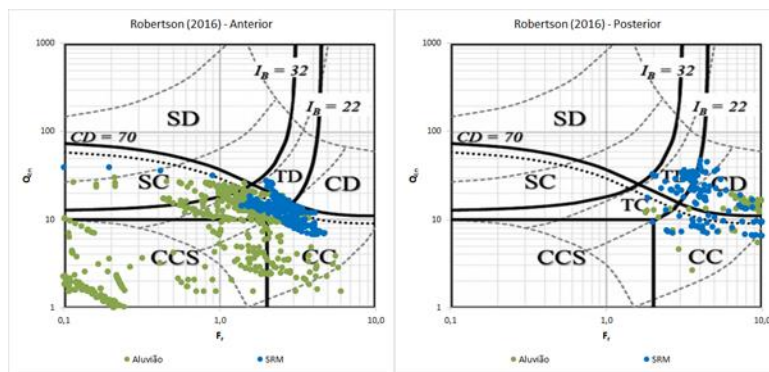


Figura 3. Ábaco comportamental – Robertson (2016).

Já a Figura 4, apresenta a avaliação da dilatância dos materiais de acordo com o valor do parâmetro de estado (ψ) (Jefferies e Been (2016)), onde valores acima de $-0,05$ apresentam profundidades com materiais contráteis. Pode-se novamente observar zonas dilatantes após as intervenções na estrutura, enquanto anteriormente os solos apresentavam comportamento predominantemente contrátil.

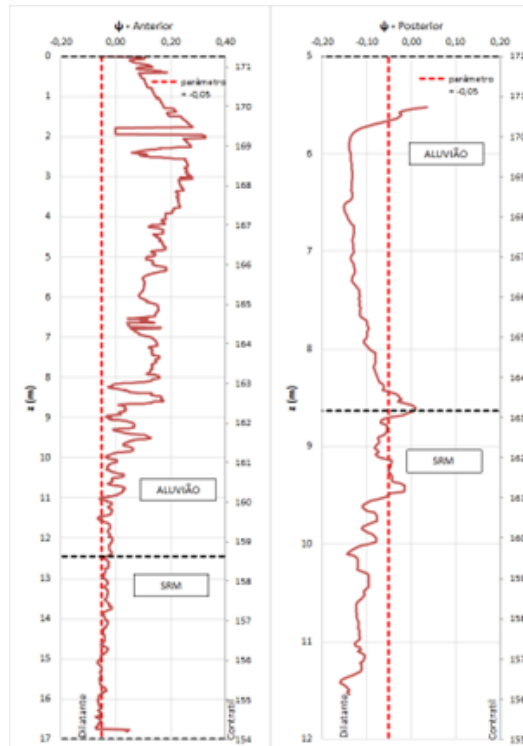


Figura 4. Avaliação da dilatância dos materiais a partir do parâmetro de estado – Jefferies e Been (2016).

Após evidenciada a melhor condição das regiões tratadas, novas análises de estabilidade foram realizadas considerando parâmetros efetivos para a região em questão. A solução conjunta, bermas de reforço de enrocamento e os geodrenos verticais, promoveram a obtenção do fator de segurança mínimo acima de 1,30 para a condição não drenada de pico e acima de 2,00 para a condição drenada. (Figura 5).

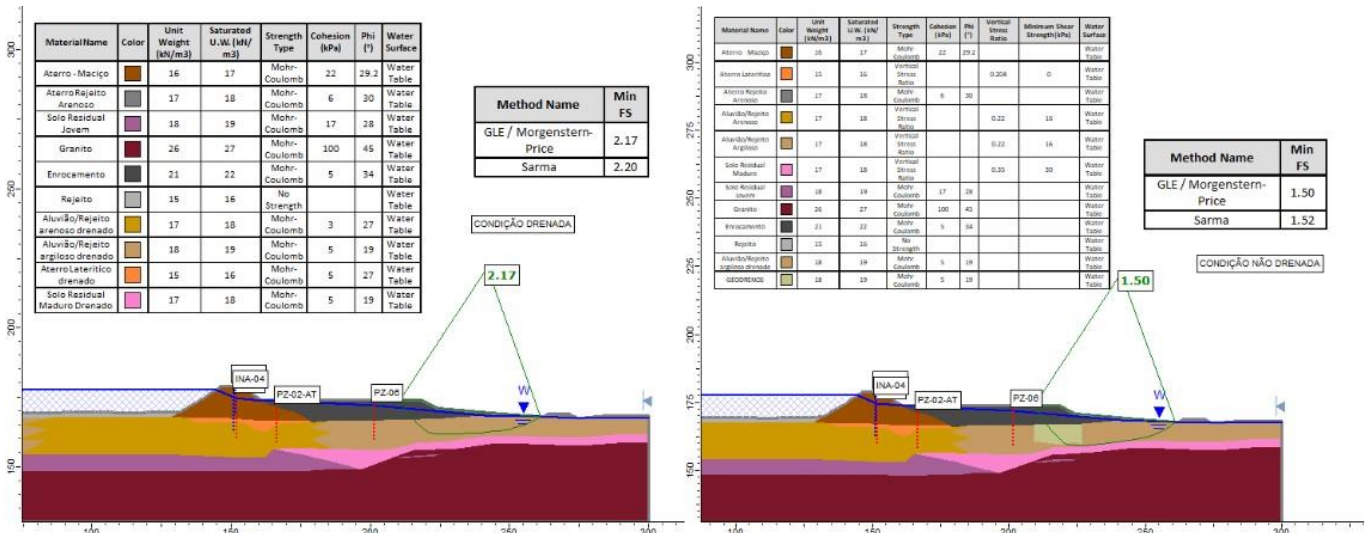


Figura 5. Análise de estabilidade após as intervenções realizadas na estrutura = FS = 2,17 (Drenada) FS = 1,50 (Não Drenada).

4 CONCLUSÃO

Conforme verificado nos estudos desenvolvidos neste artigo, o aluvião que inicialmente gera excesso de propressões passa a ter comportamento dilatante. A profundidade da mudança de comportamento corresponde à profundidade do geodreno aplicado, ou seja, 7 metros. As superfícies de ruptura críticas são

deslocadas para uma parte mais a jusante da estrutura devido à aplicação de uma berma de reforço. A berma de reforço além de estabilizar o talude de jusante, ela também contribui aplicando uma sobre carga no material mole.

A carga aplicada sobre o material mole (aluvião) possui um efeito de segunda ordem que está relacionado ao fenômeno de adensamento dos solos, principalmente onde se aplicou os geodrenos devido à melhor distância de drenagem do material. Ao invés de percorrer toda camada até a superfície, a água presente no solo, devido aos excessos de poropressão, pode percolar radialmente até o geodreno mais próximo e rapidamente ser dissipada.

Os geodrenos se mostraram, portanto, uma alternativa viável tecnicamente e com vantagens de rapidez da aplicação. Em áreas remotas, a mobilização do equipamento pode ser um gargalo que se viabiliza com um volume maior de serviços a serem executados na localidade. Percebe-se que as regulamentações avançaram a favor da segurança e a engenharia geotécnica possibilita soluções para garantir que essa segurança. Novas técnicas e materiais são essenciais para o engenheiro geotécnico, assim, os geossintéticos apresentam uma gama enorme de opções e funcionalidades, este trabalho ilustra mais uma aplicação de sucesso.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT NBR 13028:2017 – Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água - Requisitos. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2017.;
- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. Resolução nº 95, de 7 de fevereiro de 2022: consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração. Brasília, DF: ANM, 2022;
- BORGES, L.J. Aterros sobre solos moles incorporando geodrenos verticais. Análise tridimensional pelo método dos elementos finitos. Geotecnia, n. 98, p. 59-74, 2003.
- DUNCAN, J. M.; WRIGHT, S. G.; BRANDON, T. L. Soil strength and slope stability. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2014.
- FEAR, C. E.; ROBERTSON, P. K. Evaluation of flow liquefaction and liquefied strength using the cone penetration test. 2016.
- JEFFERIES, Mike; BEEN, Ken. (2016): Soil Liquefaction a Critical State Approach.
- OLSON, S. M.; STARK, T. D. Post-liquefaction reconsolidation and undrained cyclic behaviour of soils. Géotechnique, v. 59, n. 9, p. 739-749, 2009.
- ROBERTSON, P. K. Estimating in-situ state parameter and friction angle in sandy soils from CPT. In: 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, Huntington Beach, CA, USA. 2010.
- ROBERTSON P.K. 2016. Cone penetration test (CPT)-based soil behaviour type (SBT) classification system — an update. Canadian Geotechnical Journal, 53(12): 1910–1927.
- SANTOS, M.M.A. (2018) Dimensionamento de geodrenos para um aterro sobre solo mole a partir de coeficientes de adensamento obtidos em ensaios oedométricos e de piezocone. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru.